

FABIO TOMCZAK

Estudos sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil

**Trabalho apresentado como requisito parcial
para obtenção do grau de Doutor. Área de
concentração: Engenharia e Ciência dos
Materiais, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE.
Setor de Tecnologia, Universidade Federal do
Paraná.**

**Orientador: Prof. Dr. Kestur Gundappa
Satyanarayana**

**Co-orientador: Prof. Dra. Thais Helena
Sydenstricker Flores-Sahagun**

Curitiba

Agosto 2010

Agradecimentos

Agradeço a orientação dos professores Satya e Thais, pela atenção, experiência, dedicação e amizade durante o tempo de realização do trabalho.

Ao amigo Guimarães, que me ajudou nas correrias de última hora.

Agradeço aos antigos colegas de trabalho do Lactec, Sociesc e Klabin, e Suzano Papel e Celulose que participaram de uma forma ou de outra desta conquista.

Aos meus pais e minha irmã, que sempre estiveram ao meu lado.

À Fernanda, pela ajuda, paciência, compreensão e motivação nas duras noites de trabalho para a conclusão desta tese.

“Quem quer fazer algo, encontra um meio.
Quem não quer fazer nada, encontra uma
desculpa.” – **Provérbio Árabe**

Lista de publicações

TOMCZAK, Fábio; SATYANARAYANA, Kestur Gundappa; SYDENSTRICKER, Thais. H. D. Studies on Lignocellulosic Fibers of Brazil: Part III- Morphology and Properties of Brazilian Curauá Fibers. Composites. Part A, Applied Science and Manufacturing, v. 38, p. 2227-2236, 2007.

TOMCZAK, Fábio; SYDENSTRICKER, Thais. H. D.; SATYANARAYANA, Kestur Gundappa. Studies on Lignocellulosic Fibers of Brazil: Part II- Structure and Properties of Brazilian Coconut Fibers. Composites. Part A, Applied Science and Manufacturing, v. 38, p. 1710-1721, 2007.

TOMCZAK, Fábio; SYDENSTRICKER, Thais. H. D.; SATYANARAYANA, Kestur Gundappa. The Influence of Time in the Alkali Treatment of Coir Fibers in Polypropylene/Coir Composites. In: World Polymer Congress: 41st International Symposium on Macromolecules, 2006, Rio de Janeiro, Brasil. MACRO 2006, Associação Brasileira de Polímeros. Rio de Janeiro: Ailton de Souza Gomes, Chairman of MACRO 2006, 2006. v. 1.

SATYANARAYANA, Kestur Gundappa; TOMCZAK, Fábio; SYDENSTRICKER, Thais. H. D. Natural Fiber Based Hybrid Composites-An Overview. In: ACUN-5 International Composites Conference Developments in Composites: Advanced, Infrastructural, Natural and Nano-composites, 11- 14 July 2006, 2006, Sydney, Australia. Proceedings of ACUN-5-International Composites Conference: Developments in Composites: Advanced, Infrastructural, Natural & Nano-Composites. Sydney, Australia. : SriBandopadhyaya, Quinhua Zeng, C.C.Berndt, Sami Rizkalla, N.Gowripalan and Janis Matisons, 2006. v. 1. p. 438-451.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	vii
Lista de tabelas	xi
Resumo.....	xii
Abstract.....	xiv
1. Introdução.....	1
1.1 Redes Neurais.....	4
2. Revisão de literatura.....	7
2.1 Redes neurais	26
3. Métodos e materiais	33
3.1 Fibras de coco e curauá.....	33
3.2 Caracaterização mecanica das fibras	34
3.3 Microscopia eletrônica de varredura	36
3.4 Microscopia ótica.....	37
3.5 Análise térmica das fibras	37
3.6 Difratometria de raios-x	38
3.7 Análise por espectroscopia de infravermelho.....	38
3.8 Simulação das propriedades mecânicas por RNA	39
4. Resultados e discussao.....	41
4.1 Estudo sobre as fibras de coco	41
4.1.1 Propriedades mecânicas das fibras de coco	41

4.1.2	Difração de raios-X	47
4.1.3	Morfologia das fibras de coco	47
4.1.4	Efeitos térmicos	50
4.1.5	Análise por infravermelho	53
4.2	Estudo sobre as fibras de Curauá	54
4.2.1	Efeitos térmicos	54
4.2.2	Difração de raios-X	56
4.2.3	Propriedades mecânicas das fibras de curauá	57
4.2.4.	Morfologia das fibras de curauá.....	64
4.2.5.	Análise por Infravermelho	65
4.3	Modelagem das propriedades mecânicas das fibras com RNA ...	67
4.3.1	Simulação do módulo elástico através de RNA	67
4.3.2	Simulação da tensão de ruptura através de RNA.....	73
4.4.3	Simulação da deformação na ruptura através de RNA.....	78
5.	Conclusões.....	85
6.	Sugestões de trabalhos futuros	88
7.	Referencias	89
	Anexo I: Resultados dos ensaios mecânicos das fibras.....	100

Lista de Figuras

Figura 1: Ciclo de materiais renováveis [8].....	3
Figura 2: Fotografias de algumas formas de extração de fibras naturais no Brasil [52]	9
Figura 3: Estrutura da celulose [53].....	10
Figura 4: Esquema de orientação molecular de uma microfibrila de celulose [53]	10
Figura 5: Estrutura microscópica e submicroscópica da celulose [53]	11
Figura 6: Representação bidimensional da lignina [53].....	12
Figura 7: Arranjo helicoidal das fibras de celulose nas fibras naturais [60].....	16
Figura 8: Curvas típicas de tensão-deformação de algumas fibras naturais [64]..	21
Figura 9: Modelo cilíndrico de uma fibra natural [53].....	23
Figura 10: Microscopias óticas de diferentes fibras mostrando diferentes células [63, 67, 71]	23
Figura 11: Microscopias da superfície de algumas fibras naturais [54, 61, 72, 73]	24
Figura 12: Microscopias da fraturas de algumas fibras naturais [63, 74]	25
Figura 13: Apresentação esquemática para seleção de materiais compósitos (adaptado de [78]).....	27
Figura 14: Sistema nervoso humano (adaptado de [48])	28
Figura 15: Modelo não linear de um neurônio (adaptado de [48]).....	28
Figura 16: Configuração de uma rede neural artificial multicamadas (adaptado de [48])	30
Figura 17: Fibras de coco e curauá empregadas no presente trabalho	33
Figura 18: Equipamento Instron Modelo 4467.....	35
Figura 19: Determinação das propriedades mecânicas das fibras.....	36
Figura 20: Embutimento das fibras em resina para observação da seção transversal.....	37
Figura 21: Avaliação da eficiência da simulação das redes neurais	40
Figura 22: Curva de tração à ruptura de fibras de coco com diferentes diâmetros.	42
Figura 23: Influência do diâmetro nas propriedades mecânicas (Tensão de ruptura e módulo elástico) das fibras de coco.....	42
Figura 24: Influência do diâmetro na deformação à ruptura.....	43

Figura 25: Influência do diâmetro nas propriedades mecânicas (Tensão de ruptura e módulo elástico) das fibras de coco em escala Log.....	43
Figura 26: Efeito da distância entre garras nas propriedades mecânicas (Tensão de ruptura e módulo elástico) das fibras de coco.....	44
Figura 27: Influência da distância entre garras na deformação à ruptura das fibras de coco.....	44
Figura 28: Efeito da velocidade de ensaio nas propriedades mecânicas (Tensão de ruptura e módulo elástico) das fibras de coco.....	45
Figura 29: Influência da velocidade de ensaio na deformação à ruptura das fibras de coco.....	45
Figura 30: Difração de raios-X da fibra de coco	47
Figura 31: Microscopia ótica das fibras de coco (a)20x, (b)50x.	48
Figura 32: Microscopia eletrônica da superfície das fibras de coco	49
Figura 33: Microscopia eletrônica de fraturas das fibras a diferentes velocidades	49
Figura 34: Curva termogravimétrica da fibra de coco em atmosfera de nitrogênio	50
Figura 35: Curva termogravimétrica da fibra de coco em atmosfera de oxigênio..	51
Figura 36: Análise dinâmico mecânica das fibras de coco (natural e após secagem)	52
Figura 37: Espectro de infravermelho das fibras de coco	53
Figura 38: Curva termogravimétrica das fibras de curauá em atmosfera de nitrogênio	54
Figura 39: Curva termogravimétrica das fibras de curauá em atmosfera de oxigênio.....	55
Figura 40: Análise dinâmico mecânica das fibras de curauá (estado natural e seca)	56
Figura 41: Difratoograma de raios-X da fibra de curauá	57
Figura 42: Curvas típicas de tensão-deformação para a fibra de curauá com diferentes diâmetros.....	58
Figura 43: Influência das propriedade mecânicas (tensão de ruptura e módulo elástico) com o diâmetro das fibras de curauá.....	59
Figura 44: Influência do diâmetro nas propriedades mecânicas das fibras de curauá	59

Figura 45: Influência das propriedade mecânicas (tensão de ruptura) com o diâmetro das fibras de curauá em escala Log.....	60
Figura 46: Influência da distância entre garras nas propriedades mecânicas das fibras de curauá	61
Figura 47: Variação das propriedades mecânicas do curauá em função da velocidade de ensaio	63
Figura 48: Microscopias das fraturas das fibras de curauá a diferentes velocidades de ensaio.....	64
Figura 49: Superfície da fibra de curauá	65
Figura 50: Espectro de infravermelho das fibras de curauá	66
Figura 51: Esquema de RNA empregada para a simulação do módulo elástico das fibras.....	68
Figura 52: Influência do diâmetro nos valores experimentais e simulados de módulo elástico para as fibras de curauá ($5\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$; L_0 : 20mm)	69
Figura 53: Influência da distância entre garras para os valores experimentais e simulados de módulo elástico para as fibras de curauá (L_0 : 20mm)	69
Figura 54: Influência da velocidade para os valores experimentais e simulados de módulo elástico para as fibras de curauá.....	70
Figura 55: Influência do diâmetro nos valores experimentais e simulados de módulo elástico para as fibras de coco ($5\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$; L_0 : 20mm).....	70
Figura 56: Influência da distância entre garras para os valores experimentais e simulados de módulo elástico para as fibras de coco (L_0 : 20mm)	71
Figura 57: Influência da velocidade para os valores experimentais e simulados de módulo elástico para as fibras de coco	71
Figura 58: Esquema de RNA empregada para a simulação da tensão de ruptura das fibras	74
Figura 59: Influência do diâmetro nos valores experimentais e simulados de tensão na ruptura para as fibras de curauá ($5\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$; L_0 : 20mm)	74
Figura 60: Influência da distância entre garras para os valores experimentais e simulados de tensão na ruptura para as fibras de curauá (L_0 : 20mm)	75
Figura 61: Influência da velocidade para os valores experimentais e simulados de tensão na ruptura para as fibras de curauá.....	75
Figura 62: Influência do diâmetro nos valores experimentais e simulados de tensão na ruptura para as fibras de coco ($5\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$; L_0 : 20mm).....	76

Figura 63: Influência da distância entre garras para os valores experimentais e simulados de tensão na ruptura para as fibras de coco (L_0 : 20mm)	76
Figura 64: Influência da velocidade para os valores experimentais e simulados de tensão na ruptura para as fibras de coco	77
Figura 65: Esquema de RNA empregada para a simulação da deformação de ruptura das fibras	79
Figura 66: Influência do diâmetro nos valores experimentais e simulados de deformação na ruptura para as fibras de curauá ($5\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$; L_0 : 20mm)	79
Figura 67: Influência da distância entre garras para os valores experimentais e simulados de deformação na ruptura para as fibras de curauá (L_0 : 20mm)	80
Figura 68: Influência da velocidade para os valores experimentais e simulados de deformação na ruptura para as fibras de curauá	80
Figura 69: Influência do diâmetro nos valores experimentais e simulados de tensão na ruptura para as fibras de coco ($5\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$; L_0 : 20mm)	81
Figura 70: Influência da distância entre garras para os valores experimentais e simulados de tensão na ruptura para as fibras de coco (L_0 : 20mm)	81
Figura 71: Influência da velocidade para os valores experimentais e simulados de tensão na ruptura para as fibras de coco	82

Lista de tabelas

Tabela 1: Comparação de propriedades de fibras naturais e sintéticas (adaptado de [5])	2
Tabela 2: Lista de fibras naturais importantes e sua origem (adaptado de [1, 51])	8
Tabela 3: Composição química típica de fibras naturais (adaptado de [2])	13
Tabela 4: Temperatura de degradação de algumas fibras (Adaptado de [54])	14
Tabela 5: Ângulos helicoidais de algumas fibras [5,59]	16
Tabela 6: Relações entre Tensão de ruptura e distância entre garras para diversas fibras [60, 61, 66, 67]	19
Tabela 7: Valores típicos de propriedades mecânicas de fibras naturais e sintéticas [5, 63 - 65]	20
Tabela 8: Resumo dos resultados de módulo elástico experimental e simulado para as fibras de coco	72
Tabela 9: Resumo dos resultados de módulo elástico experimental e simulado para as fibras de curauá	73
Tabela 10: Resumo dos resultados de tensão de ruptura experimental e simulado para as fibras de coco	77
Tabela 11: Resumo dos resultados de tensão de ruptura experimental e simulado para as fibras de curauá	78
Tabela 12: Resumo dos resultados de alongamento na ruptura experimental e simulado para as fibras de coco	82
Tabela 13: Resumo dos resultados de alongamento na ruptura experimental e simulado para as fibras de curauá	83
Tabela 14: Resumo das correlações entre os dados experimentais e simulados para cada situação avaliada	84

Resumo

O desenvolvimento de materiais obtidos de fontes renováveis tem sido uma necessidade corrente nos últimos anos para minimizar os problemas ambientais do mundo. O emprego destes materiais vem sendo objeto de diferentes estudos e pesquisas visando sua aplicação potencial como substituto em materiais derivados do petróleo, devido ao alto custo destes últimos, impacto ambiental e poluição gerada. As fibras naturais vêm apresentando um grande potencial de aplicação em diversos setores industriais. Por isso, a compreensão de suas propriedades e entendimento delas em termos de sua estrutura é de fundamental importância para definição de novas aplicações. Neste trabalho, são avaliadas as fibras de curauá e coco do Brasil em termos das propriedades físicas, mecânicas e comportamento térmico, e a simulação das propriedades mecânicas através de redes neurais artificiais. Os valores de tensão na ruptura e módulo elástico apresentam redução com o aumento do diâmetro, em ambas as fibras. Nas duas fibras em estudo, o aumento da distância entre garras levou a redução da tensão e deformação na ruptura, enquanto aumento do módulo elástico para ambas as fibras. Por outro lado, através do aumento da velocidade de ensaio, ambas as fibras apresentaram um aumento da tensão de ruptura. O módulo elástico e deformação na ruptura não sofreram variação com o aumento da velocidade em nenhuma das fibras. As fibras de curauá apresentaram maior resistência mecânica, representada pela maior tensão de ruptura (500 – 3000MPa) contra o coco (100 a 250MPa) e pelo maior módulo elástico 50GPa contra 3GPa. As fibras de coco apresentam maior deformação na ruptura 30% quando comparado ao curauá (4%). A análise térmica das fibras mostrou os processos de degradação dos constituintes das fibras (celulose, hemicelulose e lignina), enquanto que a análise dinâmico-mecânica mostrou que a rigidez das fibras é bastante influenciada pela presença de água. A difratometria de raios-X das fibras permitiu avaliar a cristalinidade das fibras naturais, apontando uma cristalinidade de 40% para as fibras de coco e de 50,2% para o curauá. As propriedades mecânicas das fibras naturais foram simuladas através de redes neurais artificiais (RNA). Foram empregadas redes com 13 neurônios em 3 camadas ocultas, usando como parâmetros de saída as propriedades

mecânicas (tensão de ruptura, alongamento na ruptura e módulo elástico). Os sinais de entrada empregados foram a o ângulo helicoidal, quantidade de celulose, cristalinidade da fibra, condições de ensaio (velocidade e distância entre garras) e diâmetro das fibras. Também, duas das propriedades mecânicas foram empregadas como parâmetros de entrada enquanto era simulada a terceira. Para cada propriedade simulada, uma nova rede neural foi definida, com a mesma arquitetura que as outras. A correlação encontrada entre os dados experimentais e os dados simulados foi maior que 90% para todas as propriedades.

Palavras chave: fibras naturais, relação estrutura-propriedade, redes neurais artificiais.

Abstract

The development of new materials obtained from renewable sources has become a need over the last decade in order to mitigate the environmental issues of today's world. The search for this kind of materials has been subject of many researchers aiming for the replacement of the materials derived from petroleum in view of their high cost, environment impact and pollution they create. The potential of applications of natural fibers has been increasing in several manufacturing sectors. Therefore, it is of great importance to understand its physical and other properties and to know its structure in order to explore new applications. This work oriented towards these aspects of characterization. The present studies concentrates on the structure and properties of the Brazilian curauá and coconut fibers in terms of their physical, mechanical properties and thermal behavior and the mechanical properties simulation by artificial neural networks. It is observed that the values of both Young modulus and tensile strength decrease with increasing diameter of the fiber in the case of both the fibers. In the case of the two fibers studied, it is observed that increase in gauge length, both the tensile strength and strain at break decreased, while the Young modulus increased for both the fibers. On the other hand, with varying strain rate, higher tensile strength is observed with increasing strain rate. But, both Young modulus and strain at break were not influenced by the strain rate. Curauá fibers showed higher mechanical resistance, as can be seen by higher tensile strength (500 – 3000MPa), while the strength values of 100 to 250MPa is observed for coir. Also, higher Young modulus is observed for curauá (50GPa), while it is 3GPa for coir. Coir fiber showed higher strain at break 30% against 4% for curauá fiber. The thermogravimetric analysis of the fibers demonstrated the decomposition profiles of the constituents of the fibers (namely, lignin, cellulose and hemicelluloses), while the dynamic-mechanical analysis showed that the stiffness of the fibers is greatly influenced by the uptake of water. The X-rays diffraction spectra revealed the crystalline behavior of both the natural fibers, showing a 40% crystallinity index for the coconut fibers and 50,2% for the curauá. The mechanical properties of these two lignocellulosic fibers were simulated through

Artificial Neural Networks (ANN). Three ANNs with thirteen neurons in three hidden layers were used; each one had a mechanical property as an output (Strain at break, Tensile strength and Young modulus). The inputs were the microfibrillar angle, cellulose content, fiber crystallinity, test conditions (strain rate and gauge length) and fiber diameter. Also two of the strength properties were used as inputs while the third one was simulated. For each of the simulated properties, one new ANN was defined, with the same structure as the others but with different inputs and outputs. The correlation found between the experimental data and the simulated data was better than 90% for all the properties.

Key words: Natural fibers; structure-property relationships; artificial neural network.

1. INTRODUÇÃO

Os recursos naturais apresentam um importante papel nas economias de todos os países do mundo, auxiliando inclusive na área social de países em desenvolvimento. Por isso, não é surpresa a crescente onda na busca de novas aplicações de processos e produtos originários de fontes renováveis. Outro fator importante é a redução da poluição ambiental, com o emprego de materiais obtidos a partir de fontes renováveis. Entre os recursos naturais estão as fibras naturais, que podem ser classificadas com base em sua origem: vegetal, animal ou mineral. As fibras animais são normalmente compostas por proteínas (cabelo, lã), enquanto que nas fibras vegetais, a celulose é um componente sempre presente. As fibras vegetais, ou fibras lignocelulósicas, podem ser classificadas de acordo com o local de origem de sua extração da planta: folha, fruto, talo, raiz, semente ou capim [1 - 4].

As aplicações das fibras naturais são amplas, desde aplicações de baixo valor agregado, como produtos têxteis, artigos decorativos, até aplicações como reforço em materiais complexos em aplicações de alto desempenho, como aplicações automotivas. Nos últimos anos os materiais monolíticos vêm sendo substituídos por materiais poliméricos reforçado por fibras, devido principalmente a seu baixo custo e boas propriedades mecânicas. Os materiais utilizados como reforço são fibras sintéticas, tais como as fibras de vidro, carbono e aramida. Entretanto, fibras sintéticas apresentam uma série de desvantagens, tais como não são materiais obtidos de fontes renováveis, não são biodegradáveis, entre outros. Alguns fatores comparando as vantagens e desvantagens do uso de fibras naturais e sintéticas (tais como fibras de vidro ou carbono) como reforço em materiais compósitos estão listados na Tabela 1 [5 - 7].

Tabela 1: Comparação de propriedades de fibras naturais e sintéticas (adaptado de [5])

	Fibras Naturais	Fibras Sintéticas
Densidade	Baixa	Alta
Custo	Baixo	Alto
Reciclabilidade	Alta	Baixa
Consumo de energia	Baixo	Alto
Abrasão em equipamentos	Baixo	Alto
Riscos quando inalados	Nulo	Alto
Biodegradabilidade	Alta	Nenhum

Um dos fatores mais atrativos para o uso de fibras naturais como reforço em compósitos é a sua neutralidade de emissão de dióxido de carbono. O emprego de materiais de origem fóssil, como o petróleo, libera durante o processo de produção grandes quantidades de dióxido de carbono na atmosfera, o que é a maior causa do efeito estufa e das alterações climáticas no mundo [6]. O uso de fibras vegetais reduz a emissão de dióxido de carbono na atmosfera, pois são materiais obtidos de fontes renováveis, as plantas podem crescer em diferentes zonas climáticas e reciclam o dióxido de carbono presente na atmosfera. Na Figura 1 é apresentado o ciclo de materiais renováveis, onde as fibras vegetais estão incluídas [8, 9].



Figura 1: Ciclo de materiais renováveis [8]

No entanto, as fibras naturais também apresentam desvantagens na aplicação como reforço em materiais compósitos. Entre elas, é possível citar: a qualidade e eficiência da produção que depende das condições naturais, suas propriedades não são homogêneas, podendo ser associadas a condições de cultura, colheita e condições de processamento das fibras. Sua baixa densidade pode comprometer o processamento do compósito, embora seja vantajosa a leveza do material. Seu comportamento hidrofílico leva à absorção de água nos compósitos de matriz de poliolefinas, o conhecimento insuficiente sobre suas propriedades dificulta o seu uso em compósitos poliméricos com desempenho satisfatório e dificulta sua aplicação apropriada, pois o caráter polar das fibras vegetais é incompatível com a natureza apolar das poliolefinas [10, 11].

Com o objetivo de superar os problemas apresentados pelas fibras vegetais usadas como reforço em materiais compósitos, sistemas híbridos vêm

surgindo com a aplicação de fibras vegetais e sintéticas. Muitos destes compósitos híbridos envolvem fibras vegetais com fibras de vidro para a obtenção de um maior reforço na matriz. O uso das fibras de vidro melhora as propriedades mecânicas de compósitos reforçado com fibras vegetais. Em compósitos reforçado com fibras de vidro, a adição de fibras vegetais promove a redução de custo e peso sem comprometer as propriedades do material [12].

Os trabalhos realizados em compósitos com fibras vegetais envolvem principalmente estudos de propriedades mecânicas: estudos de tensão e flexão [13 – 16], impacto [6, 17], fadiga [18] além da avaliação de propriedades térmicas destes compósitos [19]. Nestes trabalhos, são avaliados a influência da quantidade de fibras nos parâmetros avaliados. Os estudos avaliam propriedades de compósitos reforçado com fibras de coco [20 – 22], banana [23, 24], cânhamo [25, 26], kenaf [27, 28], sisal [29 – 31], juta [32], linho [33], usando diferentes matrizes: resina fenólica [34], polietileno [35 - 37], polipropileno [38] poliéster [39 - 41] e epóxi [42]. Alguns trabalhos envolvem a caracterização de propriedades mecânicas após o tratamento químico de fibras, avaliando a influência nas propriedades mecânicas em fibras de coco [43] e sisal [44]. Nos compósitos híbridos, trabalhos envolvendo fibras de vidro e curauá [45], vidro/sisal [46], abacaxi/sisal/vidro foram desenvolvidos em diferentes pesquisas [47].

1.1 REDES NEURAIS

As aplicações de redes neurais artificiais são inúmeras, podendo ser citadas análises de pesquisas de mercado, controle de processos industriais, aplicações climáticas, identificação de fraudes em cartões de crédito, diagnósticos médicos, análise de imagens, classificação de dados, reconhecimento de padrões em linhas de montagens, entre outros [48].

Em aplicações em pesquisas de materiais, vários estudos vêm sendo realizados para a avaliação inicial do bom desempenho das redes neurais, incluindo sua arquitetura, funções de treinamento, seguido pelo processo de treinamento e método de avaliação. Após a rede ter aprendido a solucionar o problema baseado nos dados de treinamento, novos dados são incluídos na

rede para verificar a solução. O processo de criação de redes neurais artificiais (RNA) para estudo de propriedades de materiais pode ser dividido nos seguintes estágios: (i) coleta, análise e pré-processamento dos dados de base; (ii) treinamento da rede neural, (iii) teste da rede, avaliando seu desempenho e (iv) aplicação da rede para simulação.

A grande vantagem da RNA é sua habilidade em modelar relações complexas não-lineares multidimensionais sem qualquer suposição sobre a natureza das relações, além de que a construção das redes é obtida diretamente de dados experimentais. As limitações das redes são: (i) os dados de treinamento têm que apresentar uma relação muito próxima com os valores obtidos da simulação, (ii) são necessários dados suficientes para rede complexas e (iii) as redes neurais são puramente fenomenológicas e não produzem um entendimento do mecanismo do processo que está sendo modelado. Por isso nunca uma rede neural vai contribuir para a explicação de um fenômeno [49]. De acordo com o levantamento da literatura, não foram encontradas referências de aplicações das RNA em propriedades mecânicas de fibras naturais.

Neste trabalho são utilizadas várias técnicas de caracterização de fibras naturais e são apresentadas correlações entre as propriedades e a estrutura de algumas fibras naturais. Foram avaliadas propriedades mecânicas das fibras de coco e curauá como função do diâmetro e diferentes condições de ensaios mecânicos (velocidade e distância entre garras). Também foram avaliadas as propriedades térmicas, realizados difratogramas de raios-X e estudos de microscopias ótica e eletrônica para o entendimento das propriedades observadas nas fibras. Através de redes neurais está sendo proposto um modelo para modelagem das propriedades mecânicas das fibras em função do diâmetro, quantidade de celulose, velocidade de ensaio e distância entre garras. O objetivo é possibilitar o uso de fibras vegetais de qualquer região em aplicações da fibra ou em compósitos, de forma que a variação de suas propriedades não limite o uso do pleno potencial destes materiais. Assim, as RNA poderão adequar parâmetros específicos das diferentes fibras vegetais para o uso do máximo potencial de suas propriedades.

As propriedades mecânicas das fibras de coco e curauá foram avaliadas através de redes neurais artificiais (RNA). Os parâmetros de entrada selecionados foram o diâmetro das fibras, velocidade de ensaio e distância entre garras de tração. Os parâmetros de saída escolhidos foram as propriedades mecânicas avaliadas, neste caso a tensão de ruptura, módulo elástico e alongamento na ruptura.

2. REVISÃO DE LITERATURA

As fibras naturais são obtidas em todo o mundo, sendo algumas bastante abundantes nos trópicos. As fibras naturais podem ser classificadas de acordo com a origem de extração: folhas, frutos, talo/caule e semente. Alguns exemplos de fibras naturais estão listados na Tabela 2, que apresenta a fibra, a espécie e também a sua origem [1, 50, 51].

Existem diferentes métodos de extração para fibras das plantas e estes dependem de tipo da planta e da porção de onde são retiradas (folhas, frutos, talo). Normalmente, os métodos manuais são os mais utilizados. Existem ainda os métodos mecânicos de extração através de máquinas chamadas de “decorticadores” que são utilizados para fibras como banana, sisal, linho ou juta. Para a extração da fibra de curauá, emprega-se uma máquina chamada de “Periquita”. No processo de decomposição (“retting”), as folhas ou frutos ficam em contato com a água (salgada ou não) durante algum tempo, onde as fibras da camada externa se tornam mais fáceis para a extração. Após este período de decomposição, os frutos são golpeados para extração das fibras. As fibras de coco, juta e linho são extraídas desta maneira. O uso de facas para cortar as folhas e separação das fibras também é empregado [3, 52]. Na Figura 2 apresentam algumas fotografias de extração de fibras naturais no Brasil.

Tabela 2: Lista de fibras naturais importantes e sua origem (adaptado de [1, 51])

Fibra	Espécie	Origem
Abacá	Musa textilis	Folhas
Abacaxi	Ananus comosus	Folhas
Açaí	Euterpe oleracea	Frutos
Algodão	Gossypitum sp.	Sementes
Bamboo	(>1250 espécies)	Capim
Banana	Musa indica	Folhas
Cânhamo	Cannabis sativa	Caule/talo
Coco	Cocos nucifera	Frutos
Curauá	Ananas erectifolius	Folhas
Esponja	Luffa cylindrica	Frutos
Henequem (sisal mexicano)	Agave fourcroydes	Folhas
Juta	Corchorus capsularis	Caule/Talo
Kenaf	Hibiscus cannabinus	Folhas
Linho	Limim usitatissimtum	Caule/Talo
Piassava	Attalea funifera	Folhas
Ramie	Boehmeria nicea	Caule/Talo
Sisal	Agave sisilana	Folhas



Figura 2: Fotografias de algumas formas de extração de fibras naturais no Brasil [52]

Nas fibras naturais, a celulose é um dos componentes principais das fibras e determina as propriedades mecânicas. A celulose é um polissacarídeo, composto de carbono, oxigênio e hidrogênio e sua fórmula química é $(C_6H_{10}O_5)_n$. A estrutura da celulose está ilustrada na Figura 3. A unidade repetitiva é composta de duas unidades de anidrido de glicose, denominado de unidade celubiose. Durante a síntese da celulose, as ligações poliméricas formam longas cadeias de maneira que as moléculas ficam muito próximas através de longos segmentos, dando origem a fortes ligações químicas secundárias intermoleculares que são responsáveis pela grande resistência de materiais celulósicos [53].

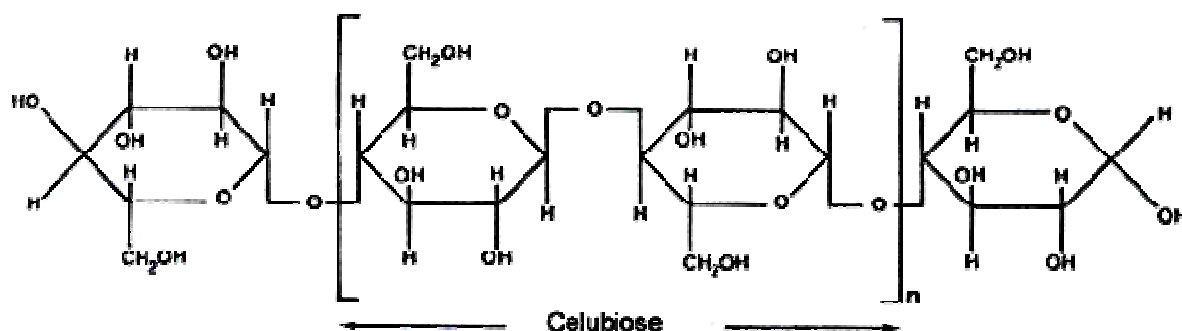


Figura 3: Estrutura da celulose [53]

As fibras celulósicas são encontradas em vários níveis de orientação, conforme ilustrado na Figura 4. Nos locais onde as moléculas se encaixam muito próximas, em longos segmentos, são desenvolvidas regiões cristalinas que representam pontos onde um solvente apresenta dificuldade de penetração de solventes. Em contraste, um solvente penetra facilmente em regiões amorfas e essas regiões são mais susceptíveis à reações de degradação. Uma ilustração da estrutura microscópica e sub-microscópica da celulose é ilustrada na Figura 5.

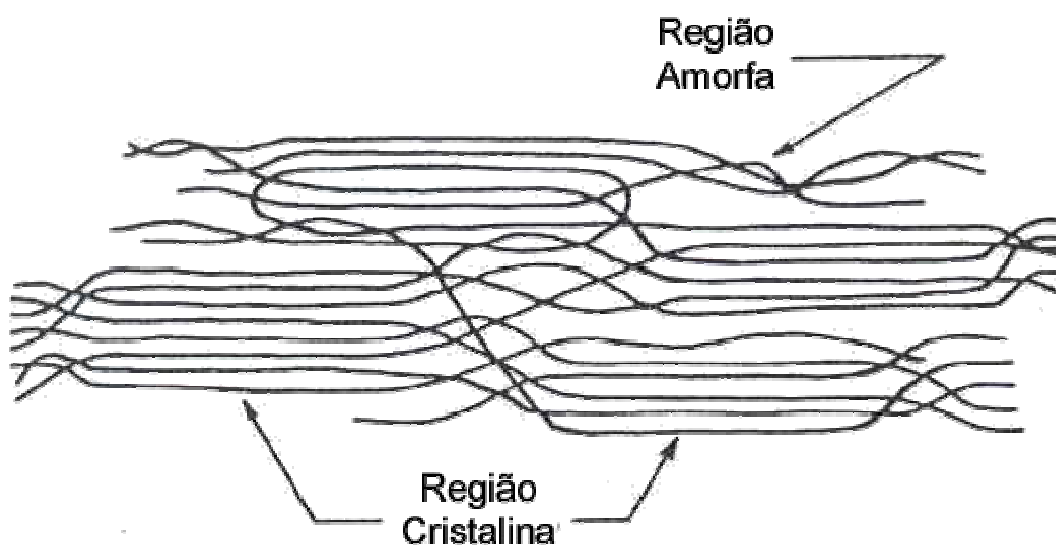


Figura 4: Esquema de orientação molecular de uma microfibrila de celulose [53]

O grau de polimerização da celulose determina as propriedades dos materiais celulósicos. Celulose com cadeias longas são denominadas de α -celulose. Celuloses com graus de polimerização menores são categorizados como β -celulose (grau de polimerização entre 15 e 90) e hemicelulose (grau de polimerização menor que 15) [53].

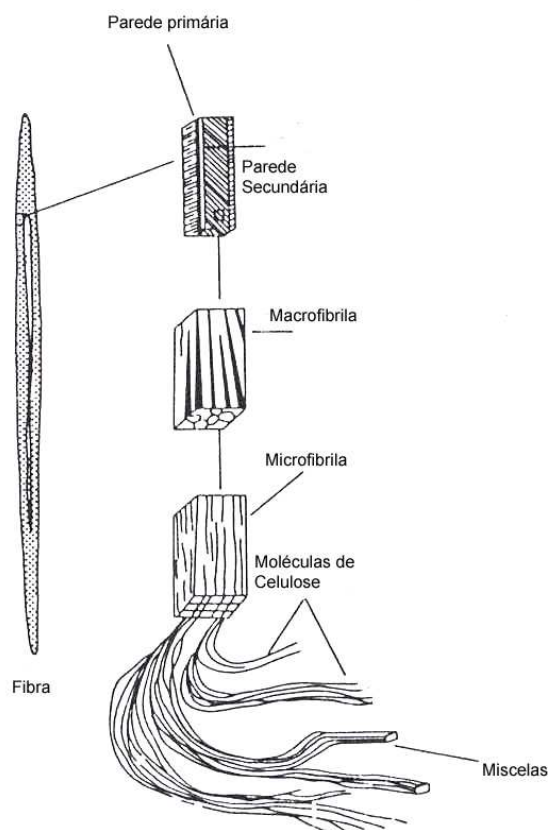


Figura 5: Estrutura microscópica e submicroscópica da celulose [53]

Em contraste à celulose, composta apenas de glicose, as hemiceluloses são polímeros compostos de cinco diferentes açúcares (glicose, manose, galactose, xilose e arabinose). Dependendo do tipo da planta, estes açúcares formam várias estruturas poliméricas que podem se associar com a porção de celulose ou com a lignina [53].

O termo holocelulose é usado para descrever toda a porção de carboidratos presentes na fibra. Além da holocelulose, as fibras contêm uma região amorfa chamada de lignina. Seu principal papel é manter as fibras de celulose unidas. Sua estrutura química é extremamente complexa (Figura 6),

composta primeiramente de unidades de fenil propano ligadas entre si formando uma estrutura tridimensional.

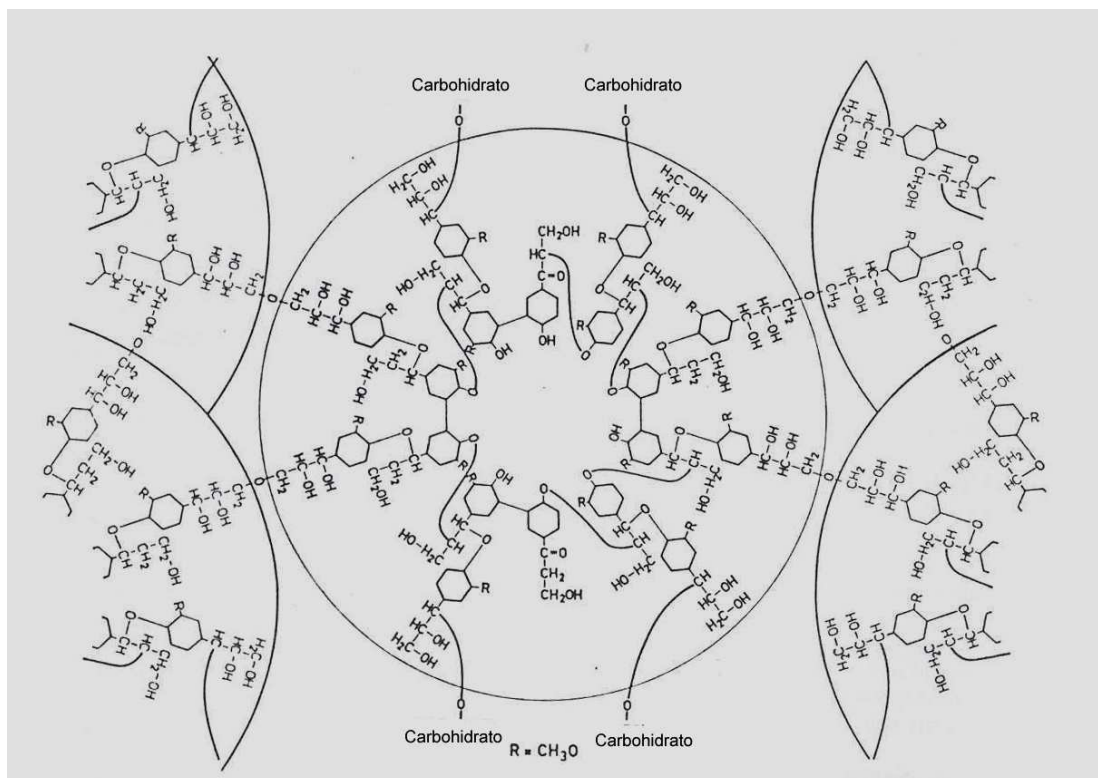


Figura 6: Representação bidimensional da lignina [53]

Em complemento à holocelulose e à lignina, existe um grande número de substâncias que podem estar presentes nas fibras naturais, dependendo da planta. Podem ser resinas ácidas, ácidos graxos e álcoois. Muitas destas substâncias são solúveis em água ou solventes orgânicos neutros, e são denominados coletivamente de extrativos. As composições químicas de diferentes fibras naturais estão mostradas na Tabela 3.

Tabela 3: Composição química típica de fibras naturais (adaptado de [2])

Fibra	α -celulose	Hemi-celulose	Lignina	Cinzas	Extrativos
Abacaxi	80 - 83	-	12	0,1 - 1	4
Bagaço de cana	54,3 - 55,2	16,8 - 29,7	24 - 25	1,1	0,7-3,5
Bambu	33 - 45	30	20 - 25	-	-
Banana	60 - 65	6,0 - 8,0	5 - 10	1,2	-
Coco	43,4 - 53	14,7	38 - 40	-	3,5
Curauá	70,7 - 73,6	21,1	8 - 11	0,8 - 0,9	2,5-2,8
Luffa Cylindrica	62	20	11	0,4	3,1
Piassava	31,6	-	48	-	-
Rami	80 - 85	3,0 - 4,0	0,5	-	6,4
Sisal	60 - 75,2	10,0 - 15,0	7 - 12	0,14-0,87	1,7-6,0

A caracterização térmica das fibras naturais é uma importante técnica analítica para avaliar a relação de estrutura/propriedade além de sua estabilidade térmica. As análises empregadas para a caracterização térmica de fibras naturais são a análise termogravimétrica (TGA), calorimetria diferencial de varredura (DSC) e análise termo-dinâmico-mecânica (DMTA ou DMA). TGA é usada para determinar a estabilidade térmica das fibras naturais e as temperaturas de degradação dos diferentes componentes constituintes. Algumas temperaturas típicas de decomposição de algumas fibras estão na Tabela 4 [54].

Estudos de DSC foram realizados por vários autores [51, 55] para determinação de temperaturas de transição térmica dos componentes e alterações nas capacidades caloríficas. As maiores dificuldades para determinar estas propriedades são a evaporação da água durante as medidas

e a sobreposição de transições envolvendo a celulose, lignina e outros componentes. A temperatura de fusão (T_m) da celulose é relatada como próximo a 300°C, o que sobrepõe as temperaturas de degradação. A temperatura de transição vítrea (T_g) da celulose, tanto na forma extraída como nas fibras naturais, apresentam valores controversos na literatura. Os valores variam de -30 a 160°C. Também são apresentadas transições secundárias para celulose e lignina [55]. A caracterização por DMTA avalia o comportamento do módulo de armazenamento (E'), o módulo de perdas (E'') com a temperatura, além de transições térmicas através da ($\tan\delta$).

Tabela 4: Temperatura de degradação de algumas fibras (Adaptado de [54])

Fibra	Temperatura de degradação (°C)
Jura	282
Linho (flax)	330
Luffa	250
Piassava	225
Sabai	244
Sisal	302

Devido ao caráter cristalino das fibras naturais, a difração de raios-X é uma importante técnica para avaliação da estrutura destes materiais. Os espectros de raios-X das fibras naturais são muito semelhantes. O pico correspondente da α -celulose está presente em 24,7°. A cristalinidade e o ângulo helicoidal das fibras podem ser determinadas através desta técnica. A cristalinidade da amostra é calculada através da seguinte fórmula [56, 57]:

$$IC(\%) = \frac{A_{Cristalina}}{A_{Total}} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde $A_{Cristalina}$ é a área do pico de difração no ângulo 2θ associado com a região cristalina da fibra, e A_{Total} é a área total do difratograma.

De acordo com a literatura, observam-se picos de difração $(1\bar{1}0)$, (110) ; (200) e (004) , característicos da α -celulose. Além da cristalinidade, é possível estimar as dimensões dos cristais de celulose utilizando a equação de Scherrer: [58]:

$$d_{hkl} = \frac{0,9 \cdot \lambda}{\beta_{1/2} \cdot \cos \theta}, \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: λ é o comprimento de onda da radiação (nm), $\beta_{1/2}$ é a largura do pico a meia altura (em radianos) e θ é o ângulo de difração. 0,9 é o fator de forma válido para partículas esféricas.

A fibra natural é composta de várias células, que são formadas por microfibrilas cristalinas constituídas de celulose, que são conectadas por meio de uma camada amorfa formada de lignina e hemicelulose. A estrutura cristalina das fibras naturais consiste de microfibrilas de celulose que são conectadas pela região amorfa composta por lignina e hemicelulose formando células. Estas células diferem em suas composições químicas (Tabela 3), e em seu ângulo helicoidal das microfibrilas. Este conjunto de parâmetros determina as propriedades mecânicas das fibras. Os ângulos helicoidais de algumas fibras são mostrados na Tabela 5 [5, 59]. Uma representação das longas fibras cristalinas na forma de espirais helicoidais dispersas em uma região amorfa está ilustrada na Figura 7 [60].

Tabela 5: Ângulos helicoidais de algumas fibras [5,59]

Fibra	Ângulo helicoidal (°)
Banana	11,0
Coco	45,0
Juta	8,0
Linho (flax)	10,0
Rami	7,5
Sisal	20,0

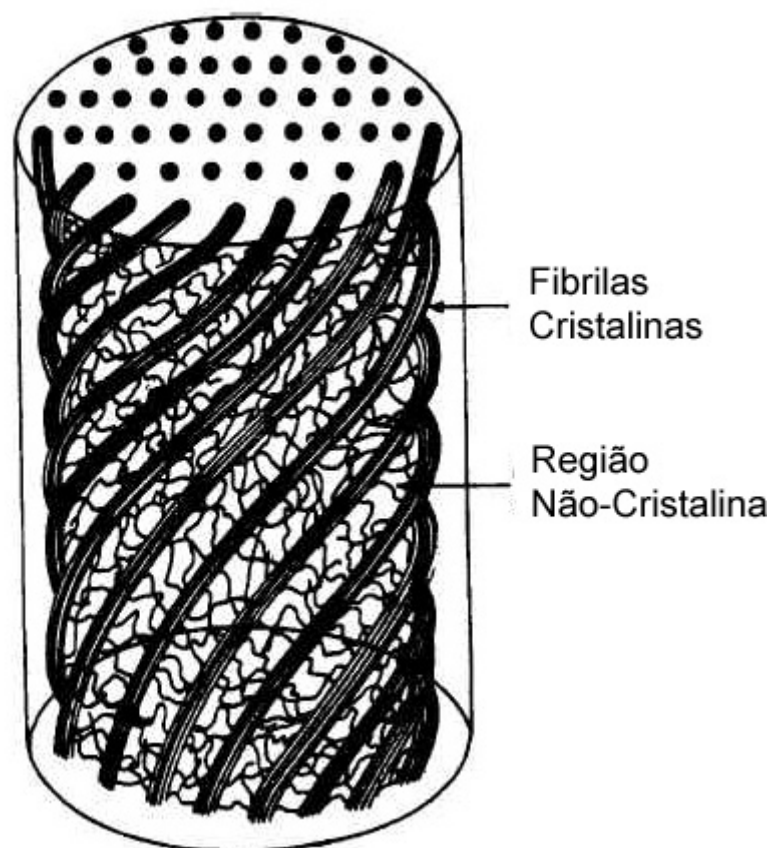


Figura 7: Arranjo helicoidal das fibras de celulose nas fibras naturais [60]

As propriedades mecânicas das fibras naturais são influenciadas por vários fatores, como local de origem (clima), maturação (idade), espécie,

método de extração, tipo de celulose(α -celulose, β -celulose), quantidade de celulose e ângulo helicoidal. Entre as propriedades mecânica avaliadas, o módulo elástico das fibras (E_f) pode ser estimado pela seguinte equação [5]:

$$E_f = \frac{E \cdot \cos^2 \theta \cdot [K \cdot (1 - 2 \cdot \cot^2 \theta)^2]}{E \cdot \cos^2 \theta + K \cdot (1 - 2 \cdot \cot^2 \theta)^2} \quad (\text{Equação 3})$$

onde K é o módulo “bulk” é definido como 35GN.m^{-2} , θ o ângulo helicoidal, e E o módulo calculado dado por:

$$E = E_C \cdot W_C + E_{NC} \cdot (1 - W_C) \quad (\text{Equação 4})$$

onde, E_C e E_{NC} são os módulos das regiões cristalinas e amorfas, ($E_C=45 \text{GN.m}^{-2}$ e $E_{NC}=3 \text{GN.m}^{-2}$), e W_C é a quantidade de celulose (fração de região cristalina na fibra) [5].

A deformação na ruptura não apresenta dependência com W_C ou σ_R , mas bastante dependente de θ . Existe uma relação parabólica entre a deformação na ruptura e o ângulo helicoidal para diversas fibras naturais dada por [62]:

$$\varepsilon = 1,30 + 9,96 \cdot 10^{-3} \cdot \theta^2 \quad (\text{Equação 5})$$

Para a fibra de coco, foi realizada por Kulkarni et al [60], a medida de diferentes ângulos para vários diâmetros de fibras encontrando a seguintes relação com ε :

$$\varepsilon = 1,24 + \frac{\theta^2}{60} \quad (\text{Equação 6})$$

Através do ângulo helicoidal é possível determinar o módulo de Young efetivo da fibra, dado por:

$$E_{f'} = W_C \cdot E_C \cdot \cos^2 \theta + W_{NC} \cdot E_{NC} \quad (\text{Equação 7})$$

Esta equação é baseada no modelo físico da célula cilíndrica, que é baseado nas seguintes aproximações: (i) as fibras contém células cilíndricas,

as quais reforçam as primeiras da mesma forma que fibras contínuas reforçam um material compósito. (ii) As células individuais consistem de várias camadas concêntricas, identificadas como parede primária (P), parede secundária externa (S_1), parede secundária do meio (S_2) e a parede secundária interna (S_3). A parede S_2 apresenta a maior contribuição para as propriedades mecânicas. (iii) As microfibrilas da parede S_2 formam uma estrutura helicoidal na parede da célula, formando um ângulo θ , constante através de toda a parede da célula. (iv) as células são consideradas como idênticas dentro da mesma espécie de fibra. O modelo cilíndrico será ilustrado mais adiante.

Valores de tensão de ruptura apresentam grande importância na caracterização das propriedades mecânicas das fibras naturais. Observar o comportamento desta propriedade variando o comprimento da fibra fornece informações com relação ao número de defeitos e imperfeições na fibra. Através de ensaios mecânicos variando a distância entre garras, por meio de regressão linear relacionando a tensão de ruptura (σ_R) e a distância entre garras (L_0), obtemos uma equação do tipo:

$$\sigma_L = m_L \cdot L + \sigma_{L_0} \quad (\text{Equação 8})$$

onde m_L é denominado de densidade de ligações fracas, expresso em $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3}$ e σ em $\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$. Algumas equações relacionando σ e L para algumas fibras originárias da Índia estão na Tabela 6. Propriedades mecânicas típicas de fibras naturais e sintéticas estão apresentadas na Tabela 7 [63 – 68].

Tabela 6: Relações entre Tensão de ruptura e distância entre garras para diversas fibras
[60, 61, 66, 67]

Fibra	Equação
Abacaxi	$\sigma = 694,1 - 446,1.L$
Banana	$\sigma = 956,7 - 1.376,7.L$
Coco	$\sigma = 302,4 - 2.320,7.L$
Palmira	$\sigma = 219,6 - 669,8.L$
Sisal	$\sigma = 796,0 - 2.367,9.L$

As curvas de tensão-deformação apresentam comportamento semelhante entre as diferentes fibras naturais. Normalmente as curvas apresentam dois comportamentos: uma região linear seguida por uma porção curva sem um ponto definido de escoamento (yield point) ou uma região linear inicial seguida por uma curta porção tensão-deformação não-linear seguida da fratura. Algumas curvas típicas estão ilustradas na Figura 8.

Tabela 7: Valores típicos de propriedades mecânicas de fibras naturais e sintéticas [5, 63 - 65]

Fibra	Diâmetro (μm)	Densidade (kg.m ⁻³)	Módulo elástico (GPa)	Tensão máxima (MPa)	Alongamento na ruptura (%)
Abacaxi	20 – 80	1440	34,5 – 82,5	413 – 1.627	0,8 – 1,6
Banana	80 – 250	1350	7,7 – 20,0	54 – 754	1,9 – 13,0
Coco	100 – 450	1150	4,0 – 6,0	106 – 175	17,0 – 47,0
Curauá	10 – 130	1100	26,0 – 46,0	700 – 1100	2,0 – 4,0
Juta	-	1450	-	533	-
Palmira	70 – 1300	1090	4,4 – 6,1	180 – 215	7,0 – 15,0
Sisal	50 – 200	1450	9,4 – 15,8	568 – 640	3,0 – 7,0
Talipot	200 – 700	890	9,3 – 13,3	143 – 264	2,7 – 5,2
Vidro	-	2600	70 – 86	2000 – 4500	2,5 – 2,8
Carbono	-	1400	230 - 240	4000	1,4 - 1,8

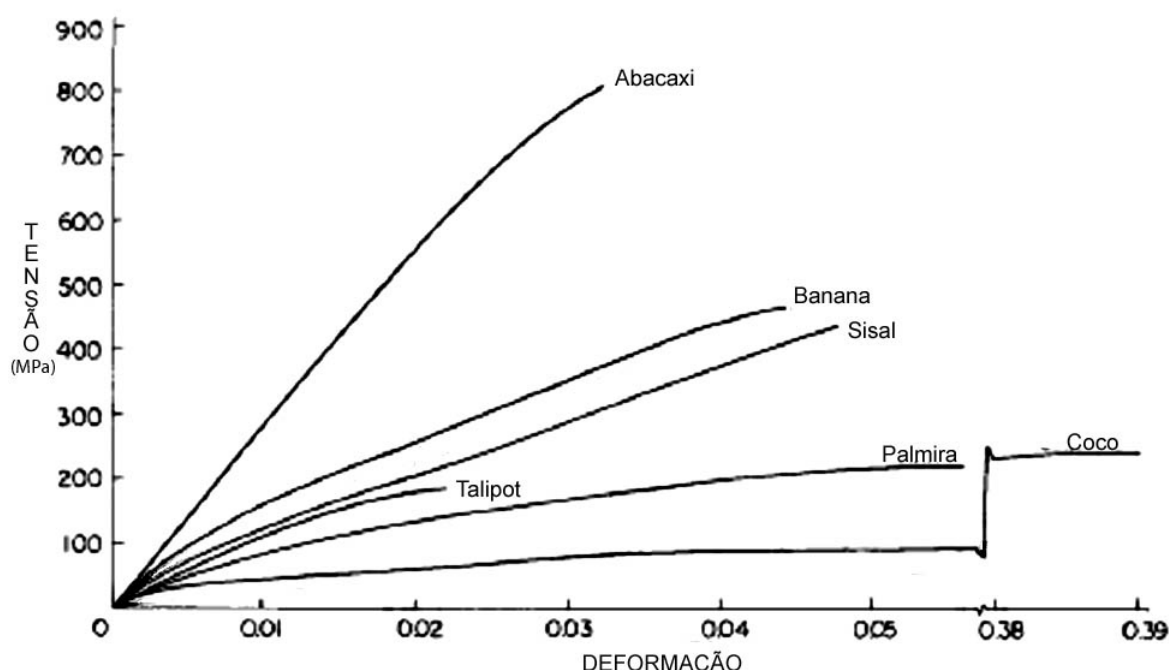


Figura 8: Curvas típicas de tensão-deformação de algumas fibras naturais [64]

As propriedades mecânicas das fibras são afetadas por tratamentos químicos como a alcalinização [69, 70], os quais são empregados para alterar a superfície das fibras naturais melhorando a interação das fibras quando são empregadas como reforço em materiais compósitos. Fibras naturais ainda apresentam impurezas, tais como ceras, óleos naturais ou óleos de processamento que ficam depositadas na superfície das fibras, afetando propriedades de compósitos [69].

A celulose forma o principal constituinte das fibras naturais e contribui para as propriedades mecânicas das fibras. Outros componentes, como lignina e hemicelulose também contribuem para as propriedades particulares de determinada fibra. A tenacidade, propriedade das fibras de absorver energia até a ruptura, reduz com a diminuição da quantidade de lignina e hemicelulose, enquanto que a resistência da fibra aumenta a um valor limite. A remoção de lignina nas fibras naturais permite a produção de fibras mais rígidas. A remoção de hemicelulose deixa a fibra menos densa e permite que a região interfibrilar entre as fibrilas se reorganizem através do eixo principal da fibra. O rearranjo das fibrilas também aumenta o índice de cristalinidade das fibras. Métodos físicos (aquecimento e secagem) são aplicados em fibras naturais para remoção de

hemicelulose. Exposição a vapor também é usado para limpeza de fibras [69,70].

As propriedades mecânicas de fibras de sisal foram avaliadas por vários autores após o tratamento químico das fibras com soda cáustica. O módulo elástico e a tensão de ruptura aumentam com o aumento da concentração em massa de NaOH até a concentração de 0,16%. Após este valor, ocorre uma redução das propriedades. Esta queda nas propriedades mecânicas é devido à degradação da celulose cristalina [70 ,71].

A análise da superfície das fibras através de microscopia ótica ou eletrônica é uma importante ferramenta para avaliação da estrutura da fibra e de modos de fratura. Microscopias das fibras naturais mostram que independentemente da origem da fibra (fruto, folha ou caule/talo), as fibras são multicelulares, mas apresentam diferença no número, tamanho e arranjo das células.

Existem quatro diferentes tipos de células: xilema, esclerênquima, floema e parênquima. O esclerênquima fornece a resistência mecânica, o xilema é espesso na região externa e fino na região interna, empregado para condução de água e sais minerais da raiz; o floema, fino, para condução de produtos da fotossíntese para varias partes da planta e o parênquima, é usado para a estocagem de alimento e água. As células individuais consistem de várias camadas concêntricas: uma camada primária, uma camada secundária, com diferentes composições e orientações de microfibras de celulose, e uma cavidade central chamada de lúmen. Cada célula está ligada entre si por uma substância intercelular isotrópica, não-celulósica. Existe ainda uma cavidade, chamada de lacuna. O modelo cilíndrico de uma fibra natural está apresentado na Figura 9, indicando todas as paredes constituintes de cada célula. A microscopia ótica de algumas fibras naturais podem ser observadas na Figura 10 [63, 67,71].

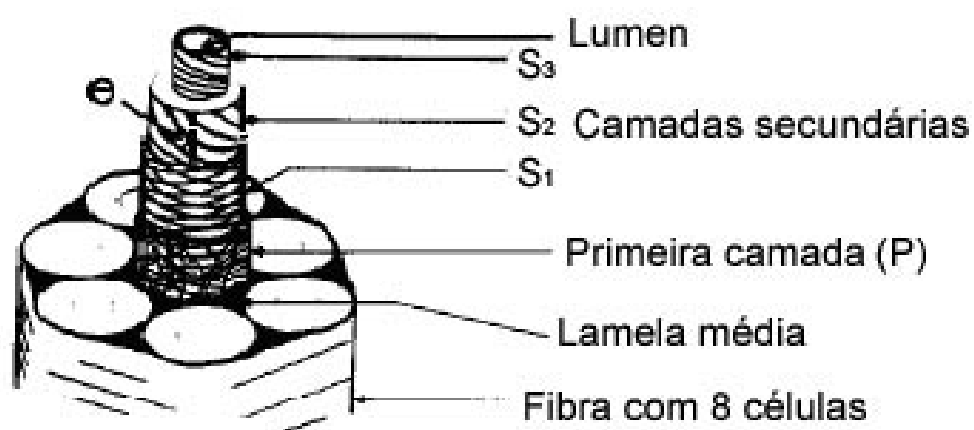
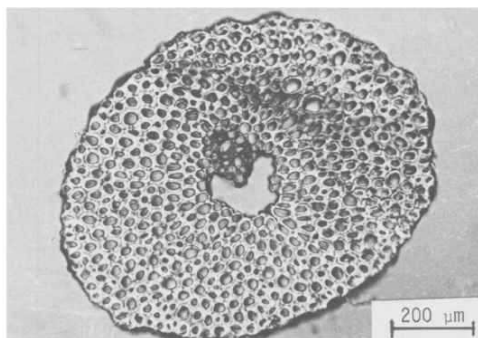
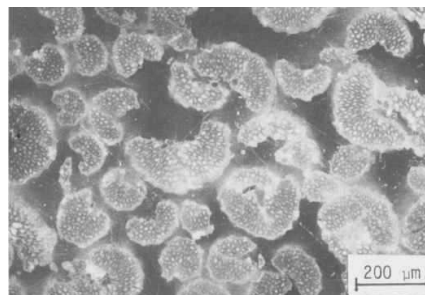


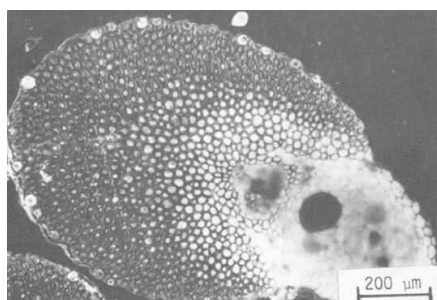
Figura 9: Modelo cilíndrico de uma fibra natural [53]



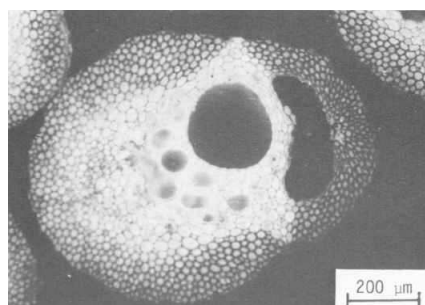
Fibra de coco



Fibra de sisal



Fibra de palmira

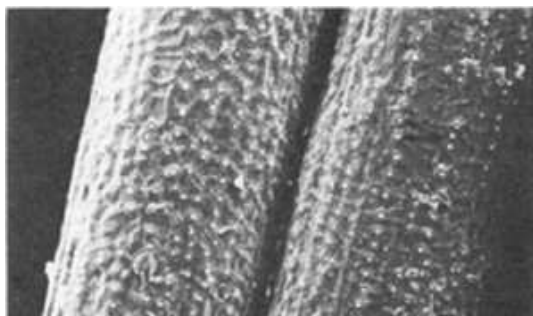


Fibra de talipot

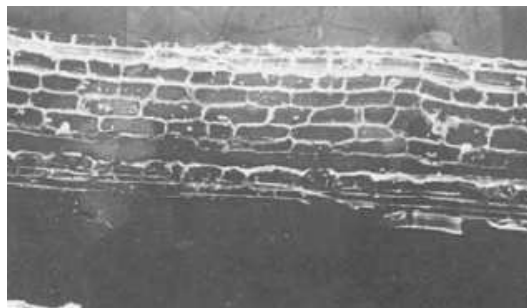
Figura 10: Microscopias óticas de diferentes fibras mostrando diferentes células [63, 67, 71]

A análise longitudinal da superfície das fibras naturais demonstra que a superfície das fibras é rugosa, com presença de varias imperfeições, trincas e

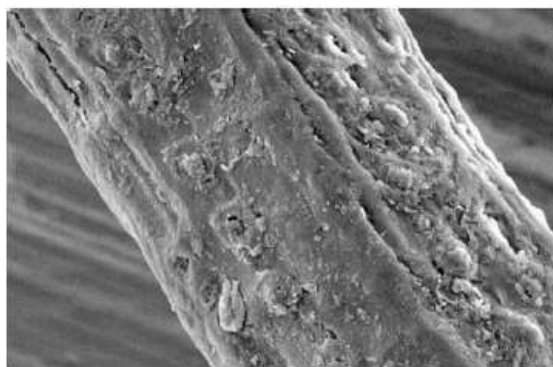
poros. Também são observados resíduos de materiais orgânicos que ficam aderidos na superfície das fibras, provenientes do método de extração das fibras. Micrografias de microscopia da superfície de algumas fibras podem ser observadas na Figura 11 [61, 63, 72, 73].



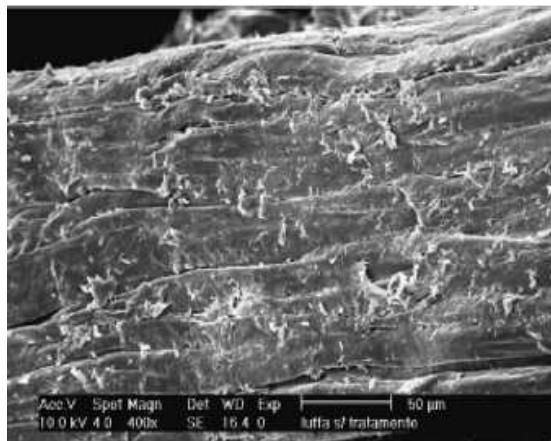
Fibra de talipot



Fibra de sisal



Fibra de coco



Fibra de luffa cilíndrica

Figura 11: Microscopias da superfície de algumas fibras naturais [54, 61, 72, 73]

A análise de fraturas das fibras naturais pode ser entendida em termos de parâmetros estruturais (quantidade de celulose, ângulo helicoidal ou dimensões da células). Através de observações de microscopias de rupturas de fibras, é possível classificar os modos de fratura em dois grupos: (a) intercelular e (b) intracelular.

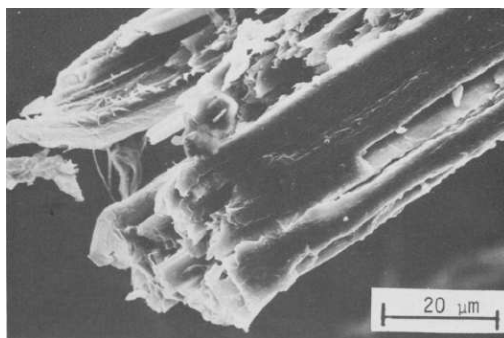
A fratura intercelular é observada onde a propagação da trinca é principalmente entre as células, através da fraca ligação entre as mesmas não sendo observado o saca-fibras de microfibrilas. Este tipo de fratura é

observado em fibras onde o alongamento na ruptura é menor que 4%. Fibras com elevada resistência mecânica apresentam este tipo de fratura.

A fratura intracelular é caracterizada pela propagação da trinca através da célula e são observados saca-fibras das microfibrilas. Tais fibras apresentam grande alongamento na ruptura, maior que 4%, e apresentam menor resistência mecânica. Fibras com elevada quantidade de celulose e baixo ângulo helicoidal também apresentam fratura intracelular. Entretanto, existem fibras que apresentam um modo misto de fratura devido a variações nos parâmetros estruturais. Este tipo de fratura é observado na fibra de sisal. Fraturas típicas de algumas fibras estão apresentadas na Figura 12.



Fibra de banana



Fibra de Abacaxi

Figura 12: Microscopias da fraturas de algumas fibras naturais [63, 74]

Uma técnica bastante empregada para a caracterização das fibras naturais é a análise de espectroscopia por infravermelho. Através desta técnica é possível observar as bandas características dos componentes das fibras: celulose, hemicelulose e lignina [75, 76]. Esta técnica também é empregada para a caracterização dos componentes individuais das fibras, tais como o estudo da lignina isolada das fibras de curauá e bagaço de cana de açúcar [77], além de poder ser usada para avaliar as modificações químicas nas fibras.

As propriedades das fibras naturais apresentam grandes variações quando comparadas entre diferentes regiões. Também as condições de execução dos ensaios de caracterização apresentam influência nas propriedades avaliadas. Por isso é importante um bom entendimento das características das fibras em função de seus parâmetros estruturais e levando

em conta a origem e condições de execução dos ensaios. Desta forma, com o entendimento das variações de propriedades observadas entre as fibras de diferentes regiões, novas aplicações das fibras poderão surgir com menor limitações.

2.1 REDES NEURAIS

Existem várias aplicações de redes neurais na área de ciência dos materiais, utilizando interconexões matemáticas através de neurônios formando uma rede que pode modelar relações complexas funcionais. As aplicações vêm crescendo em aplicações na determinação de propriedades de materiais (mecânicas e físicas), particularmente na análise de materiais complexos, com várias fases ou compósitos [78]. Para o desenvolvimento de compósitos, conhecer as características dos materiais constituintes é uma importante vantagem. Para atingir uma propriedade ou aplicação específica, os compósitos podem ser desenvolvidos selecionando as composições apropriadas, o processo de fabricação adequado e as propriedades que atendam às necessidades do produto final. Estes três estágios estão apresentados esquematicamente apresentado na Figura 13.

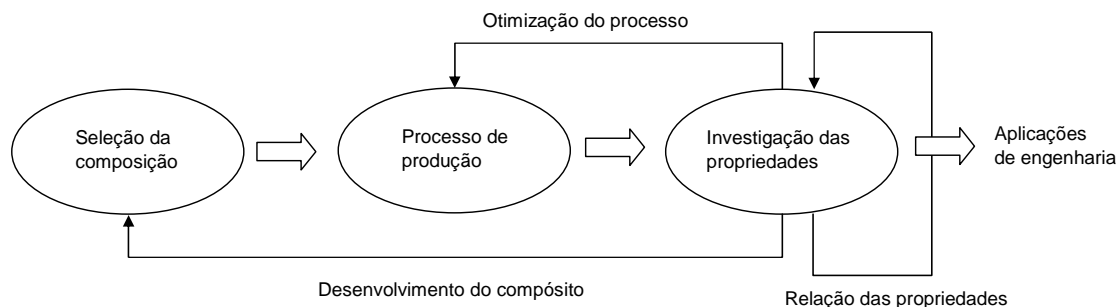


Figura 13: Apresentação esquemática para seleção de materiais compósitos (adaptado de [78])

Os três estágios mostrados na Figura 13 não são separados, mas interconectados. A integração pode ser sumarizada em 3 etapas: design do compósito, otimização do processamento e relações de propriedades. O modelamento destas relações geralmente envolve o desenvolvimento de uma ferramenta matemática derivada de dados experimentais. Uma vez estabelecida as relações matemáticas é possível reduzir significativamente o trabalho experimental envolvido no desenvolvimento de materiais compósitos. Por esta razão, RNA vêm sendo introduzidas no campo de materiais compósitos para avaliar as suas propriedades.

Estudos na área das propriedades mecânicas dos compósitos vem sendo realizados através de RNA. Entre os exemplos de aplicações estão a modelagem de fadiga, fluência, propriedades tribológicas, propriedades mecânicas, delaminação, impacto, propriedades viscoelásticas e propriedades de cisalhamento [49, 79, 80]. O comportamento viscoelástico de compósitos também foi investigado através de RNA por alguns autores [81]. Não foram encontradas aplicações de redes neurais na caracterização de fibras naturais.

As redes neurais artificiais (RNA) são sistemas computacionais que simulam a microestrutura (neurônios) de um sistema nervoso biológico. Os componentes básicos das RNAs são modelados a partir do cérebro humano e utiliza a terminologia da neurociências. O elemento básico do cérebro humano é o neurônio, que tem a habilidade de pensar, lembrar e aplicar experiências

anteriores a cada nova ação. Os neurônios naturais tem 4 componentes básicos: dendritos, soma, axônios e sinapse. O sistema nervoso humano pode ser visto como um sistema de 3 estágios, conforme Figura 14.

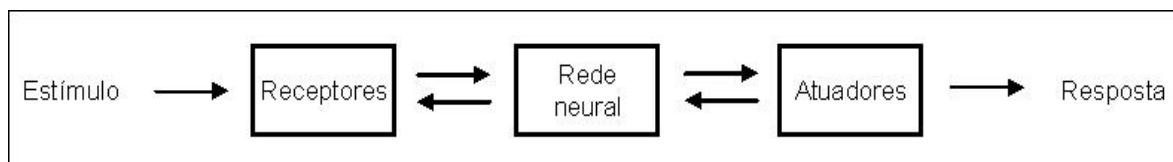


Figura 14: Sistema nervoso humano (adaptado de [48])

Os receptores convertem os estímulos do corpo humano ou do ambiente externo em impulsos elétricos transmitindo as informações para a rede neural (cérebro). Os atuadores transformam os impulsos elétricos gerados pelo cérebro em saídas do sistema. As redes neurais biológicas são construídas tridimensionalmente, com os neurônios com uma capacidade ilimitada de interconexões.

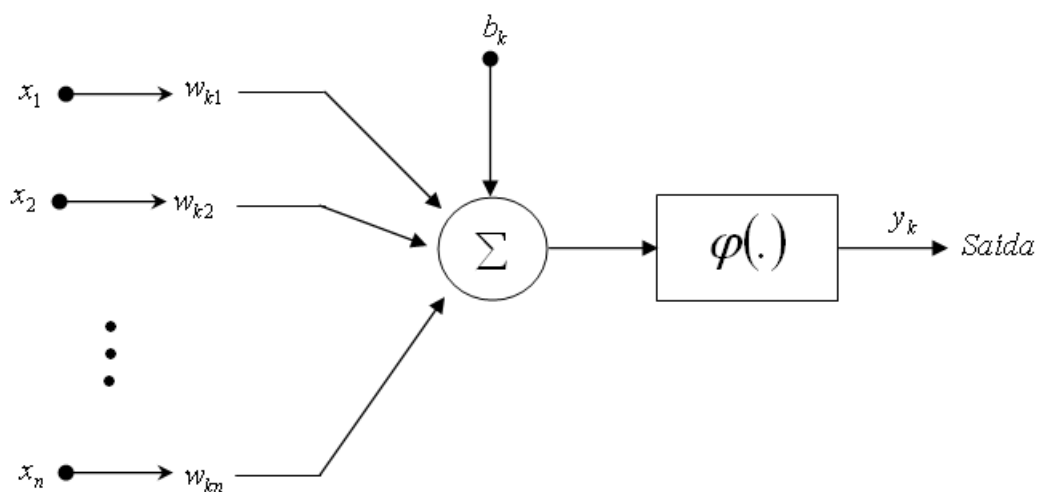


Figura 15: Modelo não linear de um neurônio (adaptado de [48])

Inspirados pelos neurônios biológicos, RNA são compostas de elementos simples operando em paralelo. Basicamente, as RNA têm uma estrutura topológica similar, alguns neurônios fazem interface com o mundo real, recebendo sinais de entrada, outros neurônios fornecem a resposta para o mundo real. Todos os outros neurônios ficam ocultos. O modelo de um neurônio com os elementos básicos está ilustrado na Figura 15.

Os três elementos básicos podem ser descritos como:

Conjunto de sinapses ou elos de conexão, cada um caracterizado por um peso ou força própria. Um sinal x_i entra na sinapse j conectada ao neurônio k e multiplicado pelo peso sináptico w_{ij} ;

Um somador usado para somar os sinais de entrada ponderados pelos peso sináptico de cada neurônio;

Um função de ativação que restringe a amplitude de saída do neurônio a um valor limitado dentro de um intervalo.

O modelo também inclui um bias aplicado externamente (b_k), que tem o efeito de aumentar ou diminuir a entrada líquida da função de ativação. Em termos matemáticos, o neurônio k pode ser descrito por um par de equações [48]:

$$u_k = \sum_{i=1}^M w_{kj} \cdot x_j \quad (\text{Equação 9})$$

e

$$y_k = \varphi(u_k + b_k) \quad (\text{Equação 10})$$

Basicamente, todas as RNA têm uma topologia similar, onde alguns neurônios fazem interface com o mundo real, sejam parâmetros de entrada ou de saída. Todos os outros neurônios ficam ocultos. A função da rede é determinada pelas interconexões entre os neurônios, que são funções não lineares. Cada entrada em um neurônio tem um fator de peso que determina as interconexões e a contribuição para os neurônios seguintes.

Para ajustar o valor de cada peso entre os neurônios, é necessário o treinamento das RNA para adequar os valores às funções. Este treinamento pode ser feito a partir da informação externa à RNA ou pelas próprias respostas dos neurônios. Esta é a principal habilidade das redes neurais para ativar o aprendizado e a memória.

As redes neurais multicamadas são as mais aplicadas na caracterização de propriedades de materiais. Um algoritmo de retropropagação é usado para treinamento das redes com diferentes funções de transferência. O termo retropropagação refere-se ao processo no qual os erros derivados da rede com respeito a pesos e bias podem ser calculados. Um ilustração esquemática de uma RNA multicamada está ilustrada na Figura 16 [49].

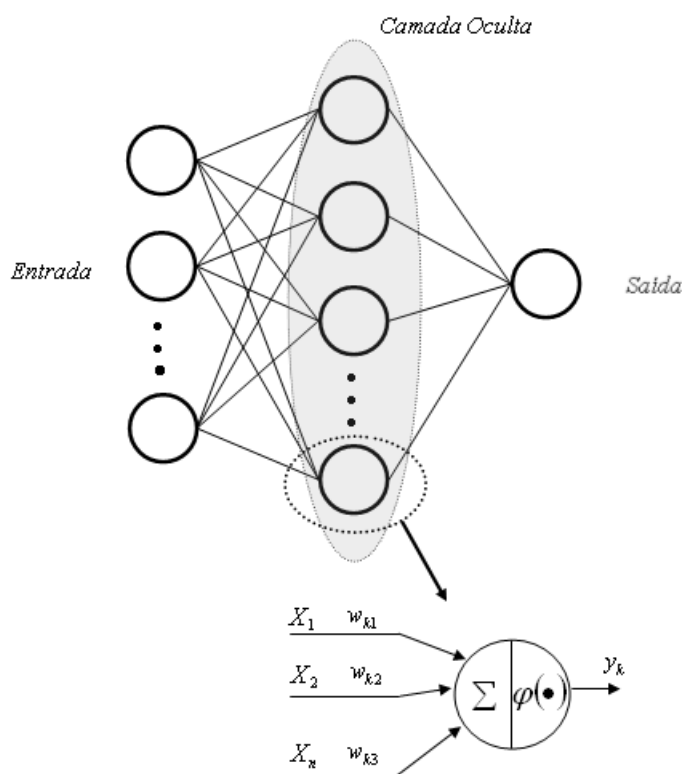


Figura 16: Configuração de uma rede neural artificial multicamadas (adaptado de [48])

Pode-se observar que as RNA são construídas basicamente com 3 camadas: entrada, camada oculta e saída. As camadas ocultas podem apresentar uma ou mais camadas e cada camada apresenta um diferente numero de neurônios.

O processo de treinamento envolve minimizar a soma dos quadrados dos erros entre os valores reais e os valores calculados pela RNA, através de dados experimentais disponíveis, por ajuste contínuo e determinando os pesos para cada neurônio.

RNA multicamadas em avanço (feed-forward) podem representar qualquer relação de entrada e saída se existirem neurônios suficientes nas camadas ocultas. Entretanto, se existirem muitos neurônios nas camadas ocultas, pode ocorrer um problema chamado de “over-fitting”. Neste caso, o erro durante o treinamento é muito pequeno, mas quando um novo valor é adicionado, o erro é grande. RNA memorizou os exemplos do treinamento, mas não aprendeu a generalizar novas situações.

O método ideal para maximizar a generalização da RNA é usar uma rede grande o suficiente para promover um melhor ajuste. Quanto maior a rede, mais complexa são as funções que a rede pode criar. Redes pequenas podem não ter o poder para ajustar os dados experimentais [49].

Para o treinamento os dados experimentais são divididos aleatoriamente em dois grupos: dados de treinamento e dados de testes. Os dados de treinamento são usados para ajustar os pesos de todos os neurônios envolvidos até que o erro desejado seja encontrado. Após isso, o desempenho da rede é determinado usando os dados de testes. A qualidade dos dados obtidos pode ser caracterizada pela raiz quadrada média do erro (RMSE) dos valores calculados pela rede e dos valores reais. Quanto menor o RMSE, melhor a qualidade da rede. O coeficiente que determina a qualidade da RNA é denominado de coeficiente de determinação B , que pode ser definido como:

$$B = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M (o(p^i) - o^{(i)})^2}{\sum_{i=1}^M (o^{(i)} - o)^2} \quad (\text{Equação 11})$$

onde $o(p^{(i)})$ é a i -ésima característica calculada, $o^{(i)}$ é o valor medido (valor real), o é o valor médio de $o^{(i)}$ e M é a número de teste. O coeficiente B descreve o ajuste da RNA da variável de saída aproximando a curva dos dados obtidos para a curva dos dados atuais[49, 80].

Devido à falta de publicações de aplicações de redes neurais em fibras naturais, este trabalho torna-se pioneiro, abrindo novas oportunidades para

novas aplicações desta técnica bastante promissora para a simulação e predição de propriedades das fibras naturais e suas aplicações.

3. MÉTODOS E MATERIAIS

3.1 FIBRAS DE COCO E CURAUÁ

Foram analisadas fibras de coco fornecidas pela EMBRAPA, da região nordeste do Brasil. As fibras de curauá foram fornecidas pela POEMATEC, da cidade de Santarém, Estado do Pará. As fibras foram recebidas em seu estado natural, com conteúdo de umidade original. A Figura 17 ilustra as duas fibras.



Fibra de coco



Fibra de curauá

Figura 17: Fibras de coco e curauá empregadas no presente trabalho

As fibras de coco são extraídas da porção externa do fruto da palmeira de coco (*Cocos nucifera* L.), normalmente considerado um subproduto. Há duas variedades de palmeira de coco: a normal, que pode atingir até 30 metros, e a anã, que não ultrapassa 3 metros. No entanto, as características são as mesmas. O tronco é cilíndrico e carrega no topo um tufo de folhas

arqueadas com 3 a 6 metros, divididas em folíolos. Os frutos dão origem sob as folhas. Em cada fruto contém uma semente, onde no interior se encontra uma massa branca, adocicada e saborosa que se espessa à medida que o fruto amadurece. No fruto verde, a massa é menos espessa e menos dura, com grande quantidade de água (água de coco). O fruto é revestido por um espesso conjunto de fibras curtas que são estudadas neste trabalho [50].

Ananas erectifolius é uma espécie de planta da região Amazônica. As suas folhas são retas, duras e com superfície plana, medem até 1 metro de comprimento com 4 cm de largura. Em oito meses, suas folhas podem atingir 1,5 metros em comprimento e produzir 50 a 60 folhas por ano. Suas aplicações pelos Indígenas incluíam redes para dormir e linhas para pesca. O processo de extração da fibra é realizado através da “força”, após a fibra é lavada, batida e mantida em água por 36 horas. São novamente lavadas e secas [13, 86 – 89].

As fibras de curauá apresentam aplicações como reforço em materiais compósitos. Entre os estudos, existem aplicações das fibras como reforço em matriz de poliéster [7] e poliuretano [90].

As fibras de curauá apresentavam diâmetros de 26 a 64 μ m, com comprimento variando de 0,30 a 1,50m. As fibras de coco apresentavam diâmetros de 131 a 229 μ m, com comprimento de 0,05 a 0,20m. As amostras foram acondicionadas em sala climatizada, com temperatura de 23,0°C (\pm 2,0) e umidade controlada a 50% (\pm 5,0%). Não foi realizado nenhum tratamento superficial das fibras para a realização dos testes de caracterização.

3.2 CARACATERIZAÇÃO MECANICA DAS FIBRAS

As propriedades mecânicas das fibras em modo de tração, foram avaliadas com uma máquina de ensaio mecânico universal Instron, modelo 4467, apresentada na Figura 18, com uma célula de carga de 100N de capacidade, com as fibras fixadas em garras pneumáticas, velocidades de ensaio (5, 10, 20 e 50 mm.min⁻¹), com variação do comprimento da amostra (5, 10, 15, 20 e 25 mm). O diâmetro das fibras foi avaliado através de um micrometro no momento da realização do ensaio mecânico. Como as fibras

apresentam variação em seu diâmetro por não serem perfeitamente cilíndricas e apresentarem variações em seu comprimento, foram realizadas cinco medidas de diâmetro e determinado o valor médio do diâmetro para cada fibra, avaliada no momento da realização do seu ensaio. Não foram empregadas outras técnicas para determinação do diâmetro das fibras devido ao grande número de fibras avaliadas, pois outras técnicas que apresentam uma maior precisão na determinação dos diâmetros das fibras, como a utilização de um microscópio.



Figura 18: Equipamento Instron Modelo 4467

Foi determinado o módulo elástico das fibras através da inclinação inicial da curva tensão-deformação. O valor da tensão de ruptura foi estimado como o máximo valor de tensão que a fibra suportou, assim como o valor da deformação na ruptura como a máxima deformação antes da ruptura. Na Figura 19 estão ilustrados os detalhes de como as propriedades foram determinadas.

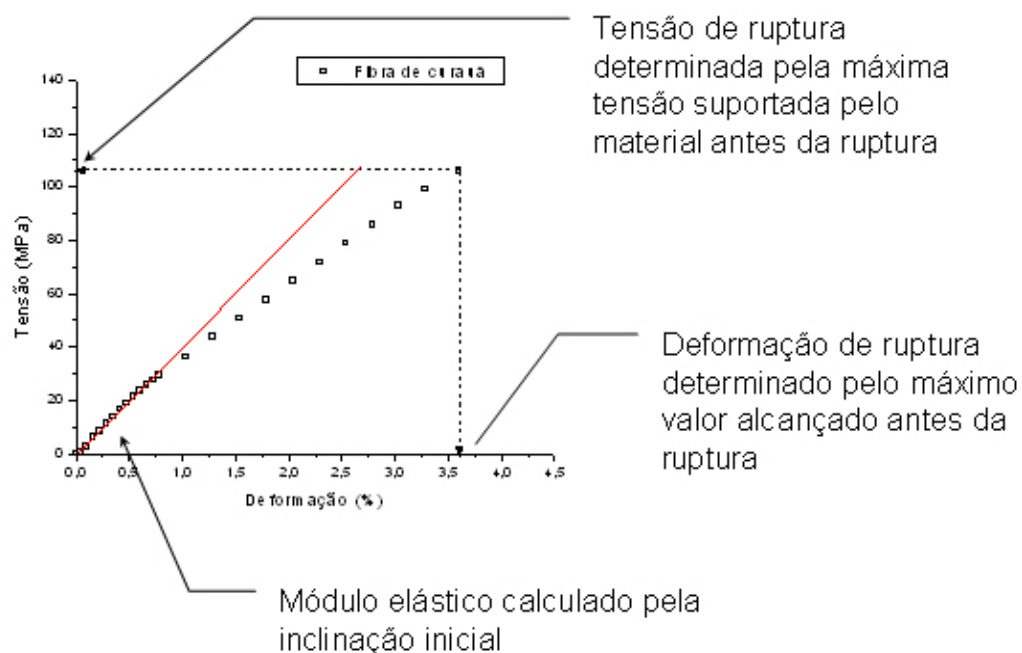


Figura 19: Determinação das propriedades mecânicas das fibras

Nas curvas de variação das propriedades mecânicas em função do diâmetro das fibras apresentam curvas de regressão calculadas através de software (Origin 6.0) que servem apenas para ilustrar uma tendência das propriedades.

3.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A caracterização morfológica das fraturas das fibras foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (SEM) em equipamento marca Philips e modelo de séries XL 30, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, com tensão de aceleração de 20kV e magnificações de 500x para as fibras de coco e de 100x para as fibras de curauá. As amostras fraturadas nos ensaios mecânicos foram fixadas em porta amostra com fita adesiva de carbono e metalizadas com ouro para condução de elétrons e para evitar acúmulo de cargas e conseqüente destruição das amostras.

3.4 MICROSCOPIA ÓTICA

Para analisar a seção transversal das fibras de coco, estas foram embutidas aleatoriamente em resina epóxi e polidas (Figura 20). As imagens foram digitalizadas com um microscópio ótico Nikon Eclipse ME600. Para as fibras de curauá não foi possível realizar este procedimento devido à características inapropriadas das fibras para serem embutidas em resina epóxi.

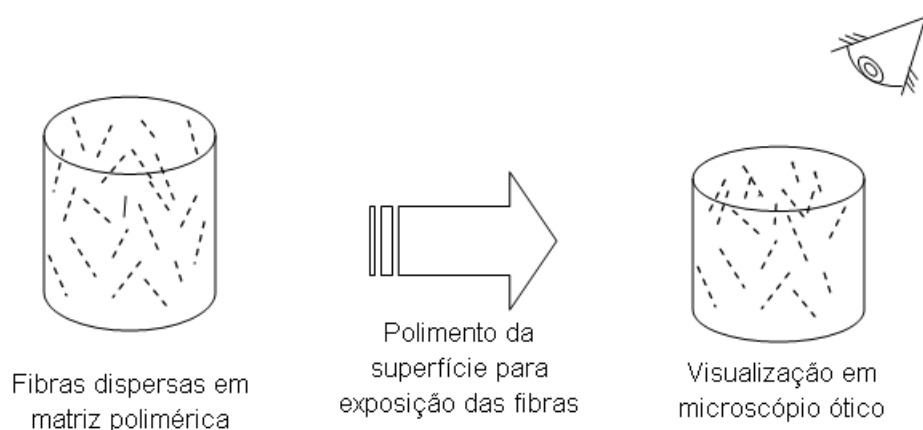


Figura 20: Embutimento das fibras em resina para observação da seção transversal

3.5 ANÁLISE TÉRMICA DAS FIBRAS

A análise térmica das fibras foi avaliada por meio das técnicas de análise termogravimétrica (TGA) e análise dinâmico-mecânica (DMA). A termogravimetria foi realizada em um equipamento TG 209 Netzsch, na faixa temperatura de 20°C a 800°C, tanto em atmosfera de nitrogênio como oxigênio, ambos sob fluxo de 15ml/min e taxa de aquecimento de 20°C.min⁻¹. Para avaliar as temperaturas de decomposição dos componentes das fibras, foi determinada a derivada da massa em relação à temperatura. As amostras utilizadas a análise termogravimétrica eram entre 4 a 6mg de fibra na forma de pó.

Na análise dinâmico-mecânica empregou-se um DMA 242 Netzsch, em modo de tração e força constante ao longo do ensaio sendo a força estática de 1,0N e força dinâmica 0,8N na frequência de 1Hz, na faixa de temperatura de -

150 a 150°C, para as fibras de coco e na temperatura de 25 a 150°C para as fibras de curauá. As curvas para as fibras de coco foram obtidas com a mesma fibra, com ciclo iniciando na ambiente sendo resfriada até -150°C e aquecida até 150°C, com de aquecimento de 3°C.min⁻¹, novamente resfriada -150°C livre de tensão e aquecida até 150°C. Para as fibras de curauá, a faixa de temperatura avaliada foi de 25 a 150°C, com as mesmas condições de força estática, dinâmica e frequência. Desta forma foi possível observar a influência da umidade sobre as características mecânicas da fibra, avaliando o módulo de armazenamento das fibras.

3.6 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

A cristalinidade das fibras foi determinada por difração de raios-X, em um difratômetro Philips X'Pert, a radiação empregada foi a Cu-K α , com comprimento de onda de 1,54.10⁻¹⁰ m e filtro de níquel. As condições de medida foram 40kV e 50mA e varredura de 2°.min⁻¹. As amostras foram analisadas na forma de pó, aproximadamente 10mg de fibras. O índice de cristalinidade foi calculado pelo método da área, onde a cristalinidade é expressa pela razão entre a área total das regiões cristalinas e a área total do material (amorfo e cristalino) x 100.

$$I_c = \frac{A_{Cristalina}}{A_{Amorfa}} \cdot 100 \quad (\text{Equação 12})$$

Através dos picos obtidos também foi possível estimar as dimensões dos cristalitos de celulose utilizando a equação de Scherrer:

$$d_{hkl} = \frac{0,9 \cdot \lambda}{\beta_{1/2} \cdot \cos \theta} \quad (\text{Equação 13})$$

3.7 ANÁLISE POR ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO

A análise de infra-vermelho por Transformada de Fourier foi realizada em um Bio Rad Excalibur Series FTS 3500 GX, na faixa de 400 a 4000cm⁻¹, scan 32, e resolução 4cm⁻¹. Foram usadas fibras cortadas, na forma de

tabletes (2% em massa) de KBr, prensadas a 8 toneladas/cm² durante 5 minutos.

3.8 SIMULAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS POR RNA

A modelagem das propriedades mecânicas das fibras de coco e curauá foram avaliadas através de RNA empregando o software Pythia. Os dados experimentais com os resultados das propriedades mecânicas das fibras foram separados aleatoriamente em dados para treinamento e dados para teste. Os sinais de entradas foram definidos como: ângulo helicoidal, quantidade de celulose, cristalinidade da fibra, velocidade do teste, distância entre garras, diâmetro das fibras, além das propriedades mecânicas (tensão de ruptura, deformação na ruptura e módulo elástico). As propriedades de saída ou respostas foram definidas como as propriedades mecânicas avaliadas nos ensaios, sendo elas deformação na ruptura, módulo elástico e tensão na ruptura, foi criada uma RNA para cada propriedade de saída de cada uma das fibras. Quando uma propriedade mecânica era definida como parâmetro de saída, este parâmetro não era empregado como sinal de entrada.

O modelo computacional foi desenvolvido para simulação das propriedades mecânicas das fibras de coco e curauá. Os dados experimentais iniciais foram divididos aleatoriamente em dois conjuntos, um para treinamento da rede e outro para a verificação. A eficiência de cada modelo foi avaliada através da correlação entre os dados observados e os dados simulados. Foram desenvolvidos três modelos, um para cada uma das propriedades avaliadas.

Os dados referentes aos testes experimentais (valores de tensão e deformação de ruptura, módulo elástico, diâmetro das fibras) foram divididos aleatoriamente em dois grupos, sendo 70% dos dados para treinamento e 30% para sua verificação. Para cada propriedade avaliada foi determinada uma rede neural artificial que determinou os valores dos pesos para cada interação, O critério de erro fixado para a diferença entre os valores experimentais e os valores modelados foi fixado em 1%. Para cada rede neural foi realizada uma determinada quantidade de treinamentos (em média em torno de 20) visando o menor erro possível.

Para avaliar a eficiência dos dados simulados através das redes neurais foram elaborados dois gráficos (Figura 21): (i) gráfico entre os dados simulados e experimentais, nas mesmas condições de ensaio e (ii) uma curva entre os dados simulados e experimentais calculando o coeficiente de correlação pelo coeficiente de correlação encontrado na equação. Ao final da simulação de cada parâmetro foi elaborada uma tabela resumindo os coeficientes de correlação para cada rede neural.

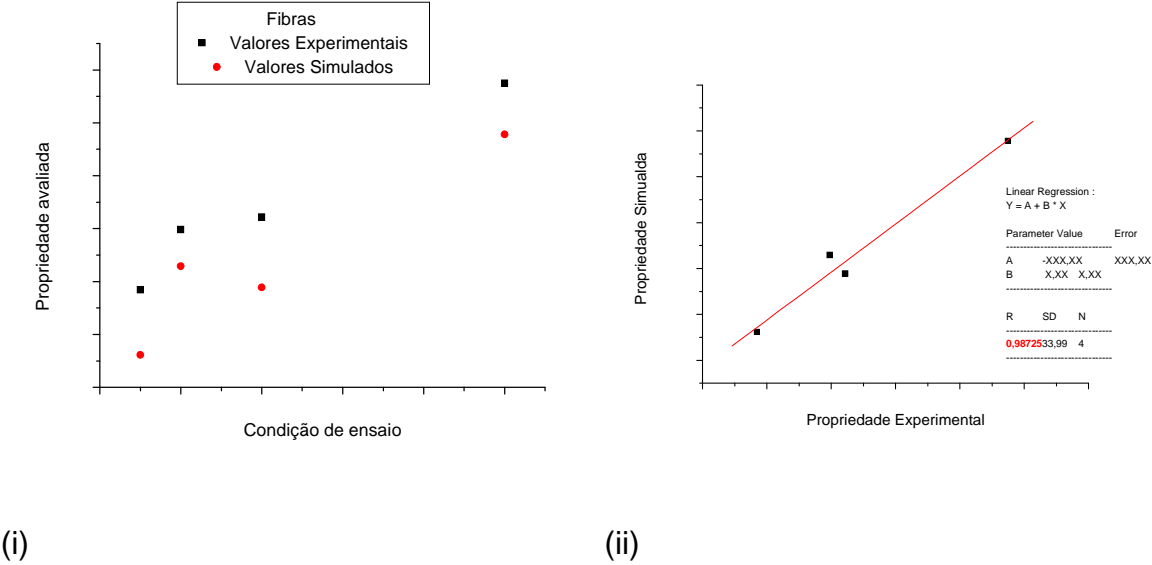


Figura 21: Avaliação da eficiência da simulação das redes neurais

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ESTUDO SOBRE AS FIBRAS DE COCO

4.1.1 Propriedades mecânicas das fibras de coco

Foram realizados diversos ensaios de tração à ruptura das fibras de coco com diferentes diâmetros. Na Figura 22 são demonstrados os resultados para diferentes diâmetros de fibras, variando de 131 a 229 μ m. Através das curvas de tensão x deformação, foi determinado o módulo elástico das fibras a partir da porção linear inicial da curva. A tensão de ruptura foi determinada como a última tensão na qual a fibra suportou a tensão aplicada, na região de deformação plástica. As propriedades mecânicas avaliadas são ilustradas em função do diâmetro das fibras nas Figura 23 e Figura 24. Este comportamento é observado em fibras de abacaxi [67] e linho (flax) [82, 83]. Entretanto, para fibras de coco da Índia, o comportamento observado é o contrário [60]. Os valores de deformação na ruptura apresentam uma pequena variação, mas podem ser consideradas constantes a 30%.

A influência do diâmetro da fibra pode ser explicado em termos de propriedades estruturais das fibras. Com o aumento do diâmetro, há variações no número de células constituintes, alterando outros parâmetros estruturais, tais como ângulo helicoidal, volume das células constituintes e número de defeitos. Todos estes fatores atuam diminuindo a resistência das fibras (queda da tensão de ruptura e módulo elástico). A deformação na ruptura não apresenta relação com o diâmetro das fibras.

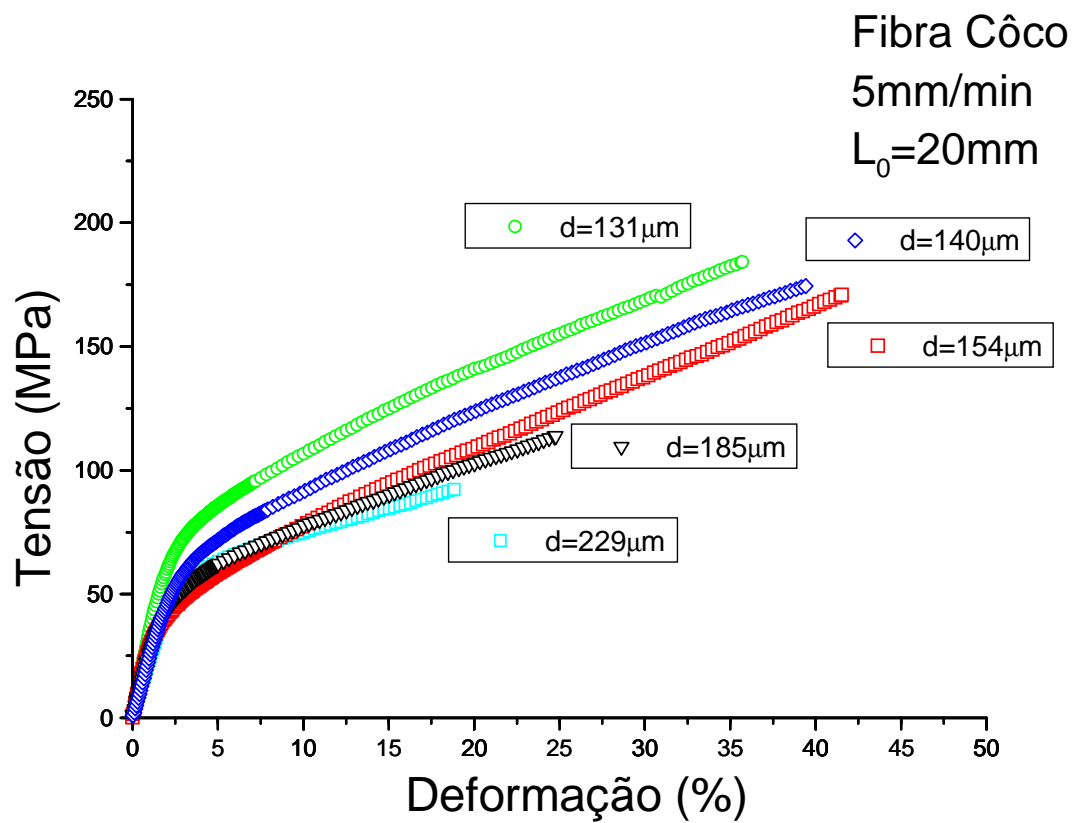


Figura 22: Curva de tração à ruptura de fibras de coco com diferentes diâmetros.

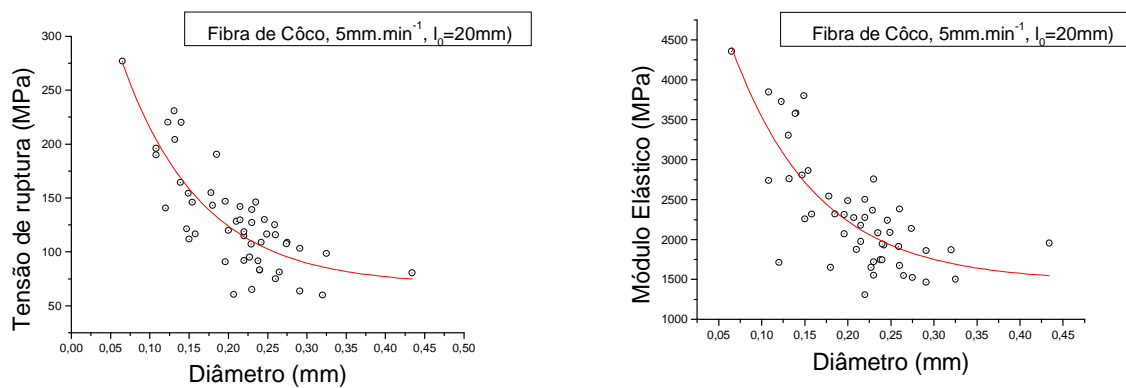


Figura 23: Influência do diâmetro nas propriedades mecânicas (Tensão de ruptura e módulo elástico) das fibras de coco

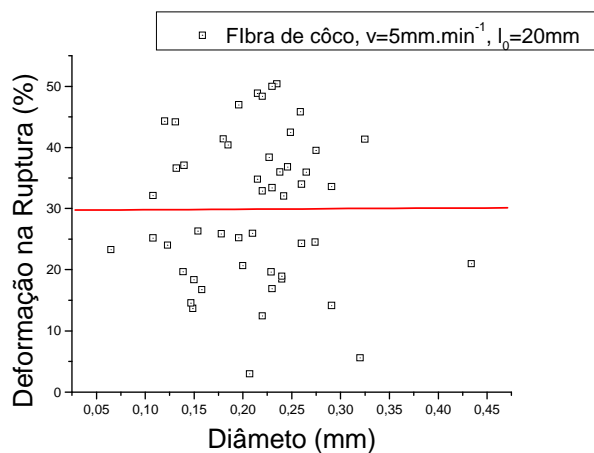


Figura 24: Influência do diâmetro na deformação à ruptura

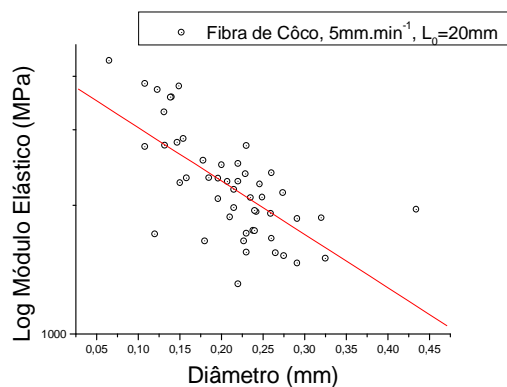
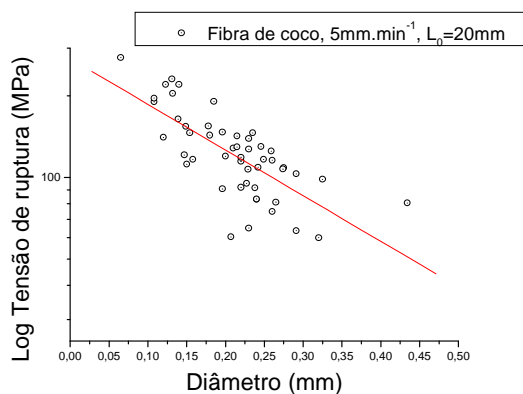


Figura 25: Influência do diâmetro nas propriedades mecânicas (Tensão de ruptura e módulo elástico) das fibras de coco em escala Log

Avaliando os gráficos de tensão de ruptura e módulo elástico em escala logarítmica observa-se uma relação linear entre as propriedades mecânicas e o diâmetro, conforme apresentado na Figura 25.

O efeito da distância entre garras é apresentada nas Figura 26 e Figura 27. Foram variados as distâncias de 5 a 25 mm, fibras com diâmetro médio de 0,225mm, testados a velocidade de 5mm/min. Através dos resultados apresentados, observa-se que a tensão e a deformação na ruptura média apresentam uma tendência de diminuição com o aumento de L_0 , enquanto que

o módulo elástico aumenta com L_0 . Este comportamento é observado em outras fibras [54, 61, 66, 67].

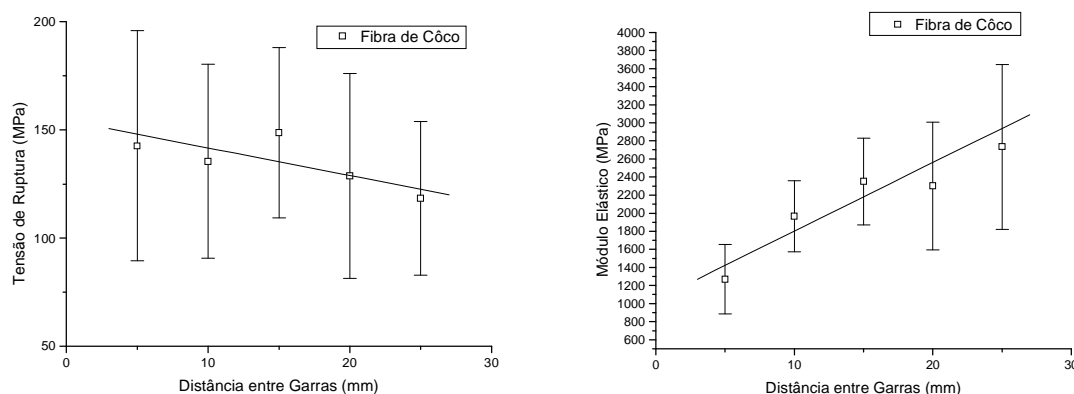


Figura 26: Efeito da distância entre garras nas propriedades mecânicas (Tensão de ruptura e módulo elástico) das fibras de coco.

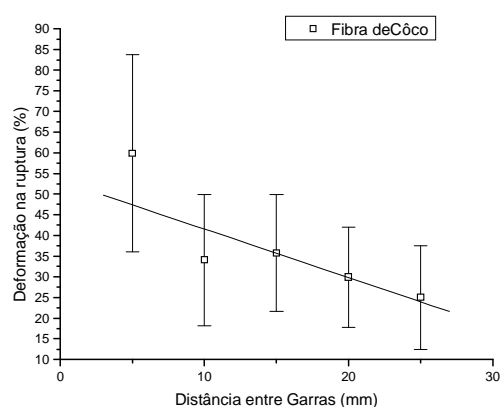


Figura 27: Influência da distância entre garras na deformação à ruptura das fibras de coco

Realizando a análise de regressão entre a tensão de ruptura e a distância entre garras, temos uma equação definida por $\sigma = 147,84 - 1106 \cdot L$ com um coeficiente de correlação de 0,97. Através desta equação é possível calcular a densidade da ligação estimada em 1.106 MN/m^3 , menor que valores encontrados em literatura, 2.310 MN/m^3 [66].

O efeito da velocidade de tração está apresentado nas Figura 28 e Figura 29. Foram avaliadas as velocidades de ensaio de 5, 10, 20 e 50

mm/min, mantendo L_0 : 20mm. Os valores médios de tensão de ruptura apresentam uma tendência de aumento de 128,7 a 155,4 MPa com o aumento da velocidade de ensaio. Os valores de módulo elástico e deformação na ruptura não são afetados pela velocidade de ensaio. O comportamento observado é contrário ao obtido em fibras de coco da Índia, mas semelhantes ao de fibras de sisal do mesmo país [66].

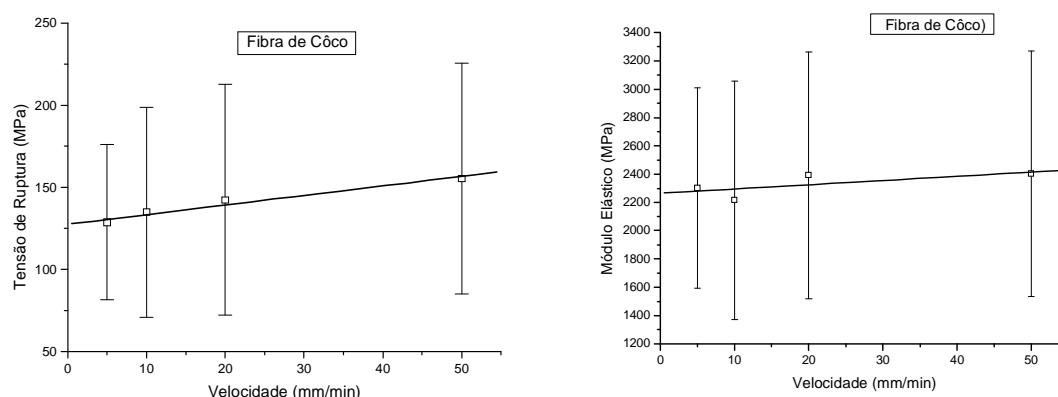


Figura 28: Efeito da velocidade de ensaio nas propriedades mecânicas (Tensão de ruptura e módulo elástico) das fibras de coco.

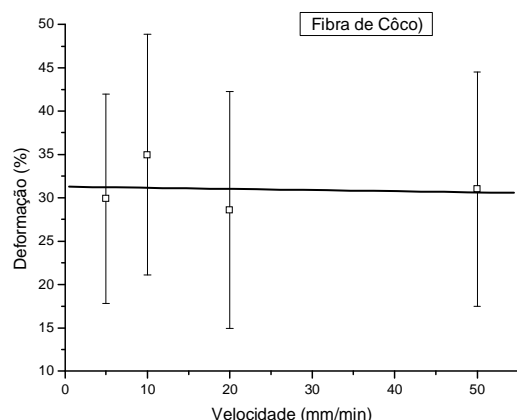


Figura 29: Influência da velocidade de ensaio na deformação à ruptura das fibras de coco

As propriedades mecânicas das fibras de coco são dependentes de vários fatores, tais como o local de origem, composição química, maturação, espécie e método de extração. Outro fator que influencia são as condições de

realização dos ensaios. Estes fatores explicam diferenças encontradas nas propriedades neste trabalho com outras publicações [55].

Através das equações (14) e (15) é possível determinar os valores de ângulo helicoidal para as fibras de coco:

$$E_f = \frac{E \cdot \cos^2 \theta \cdot [K \cdot (1 - 2 \cdot \cot^2 \theta)^2]}{E \cdot \cos^2 \theta + K \cdot (1 - 2 \cdot \cot^2 \theta)^2} \quad (\text{Equação 14})$$

e

$$E = E_C \cdot W_C + E_{NC} \cdot W_{NC}; \quad (\text{Equação 15})$$

Empregando os valores experimentais de módulo elástico para diferentes diâmetros, encontramos um valor médio de ângulo helicoidal de 51°. Este valor é maior do que outros encontrados na literatura. Para validar o valor do ângulo helicoidal, foi calculada a deformação à ruptura para as fibras de coco:

$$\varepsilon = \frac{\theta^2}{60} + 1,24, \quad (\text{Equação 16})$$

Foi obtido um valor de deformação na ruptura de 45,5%, que está dentro dos resultados experimentais obtidos.

Todos os resultados da caracterização mecânica das fibras de coco obtidos neste trabalho estão apresentados no Anexo I.

4.1.2 Difração de raios-X

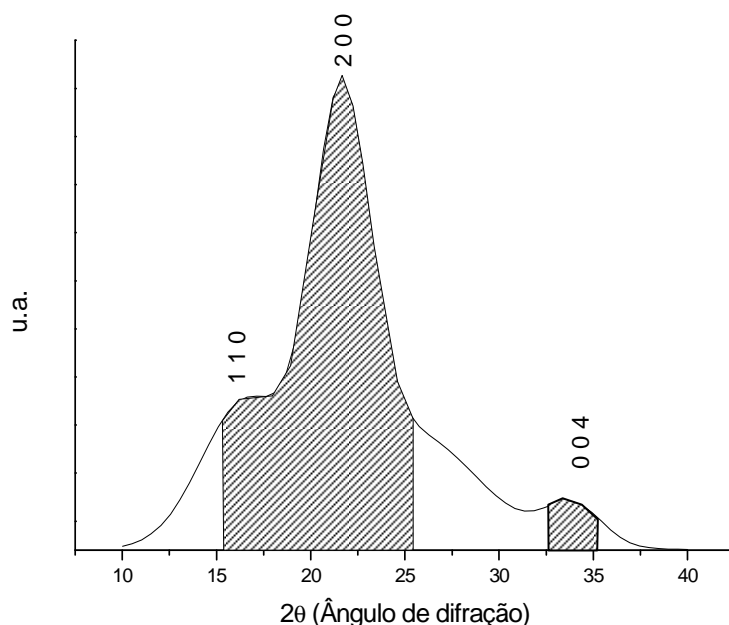
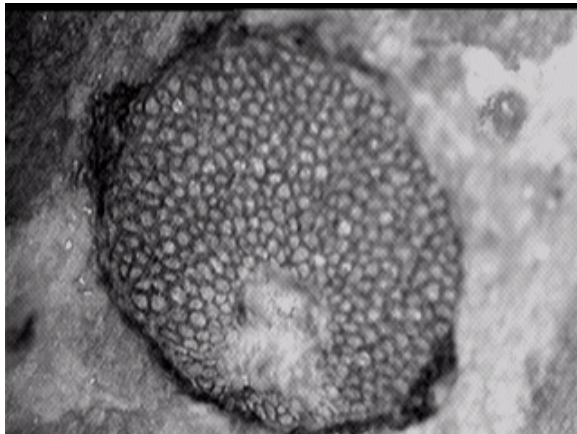


Figura 30: Difração de raios-X da fibra de coco

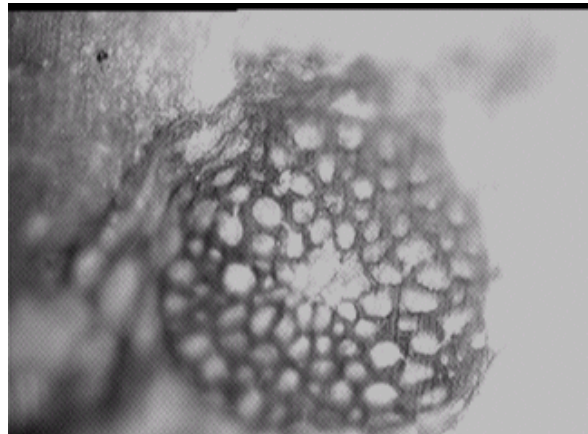
O espectro de difração de raios-X das fibras de coco está ilustrado na Figura 30, onde está indicado o pico referente à região cristalina em $2\theta = 22^\circ$. O índice de cristalinidade calculado para esta fibra é de 40%, comparável a 44% em outras publicações [84]. O índice de cristalinidade foi estimado pelo método da área, onde a cristalinidade é expressa pela razão entre a área total das regiões cristalinas e a área total do material (amorfo e cristalino) x 100. Calculando o tamanho do cristal de celulose no pico de difratograma (2 0 0) pela equação de Scherrer, encontramos um valor de 10,3nm.

4.1.3 Morfologia das fibras de coco

A microscopia da seção transversal da fibra de coco é mostrada na Figura 31. Através destas imagens é possível observar que as fibras são compostas de diferentes tipos de células regularmente arranjadas com uma lacuna no centro da fibra. As células apresentam formas circulares.



(a)



(b)

Figura 31: Microscopia ótica das fibras de coco (a)20x, (b)50x.

Na Figura 32 esta apresentada a micrografia da superfície da fibra de coco. Na Figura 33 está apresentada fraturas das fibras a diferentes velocidades de ensaio. A fibra de coco apresenta uma fratura dúctil, com saca-fibras de microfibrilas. Também é observado que a velocidade não influencia no modo de fratura das fibras de coco.

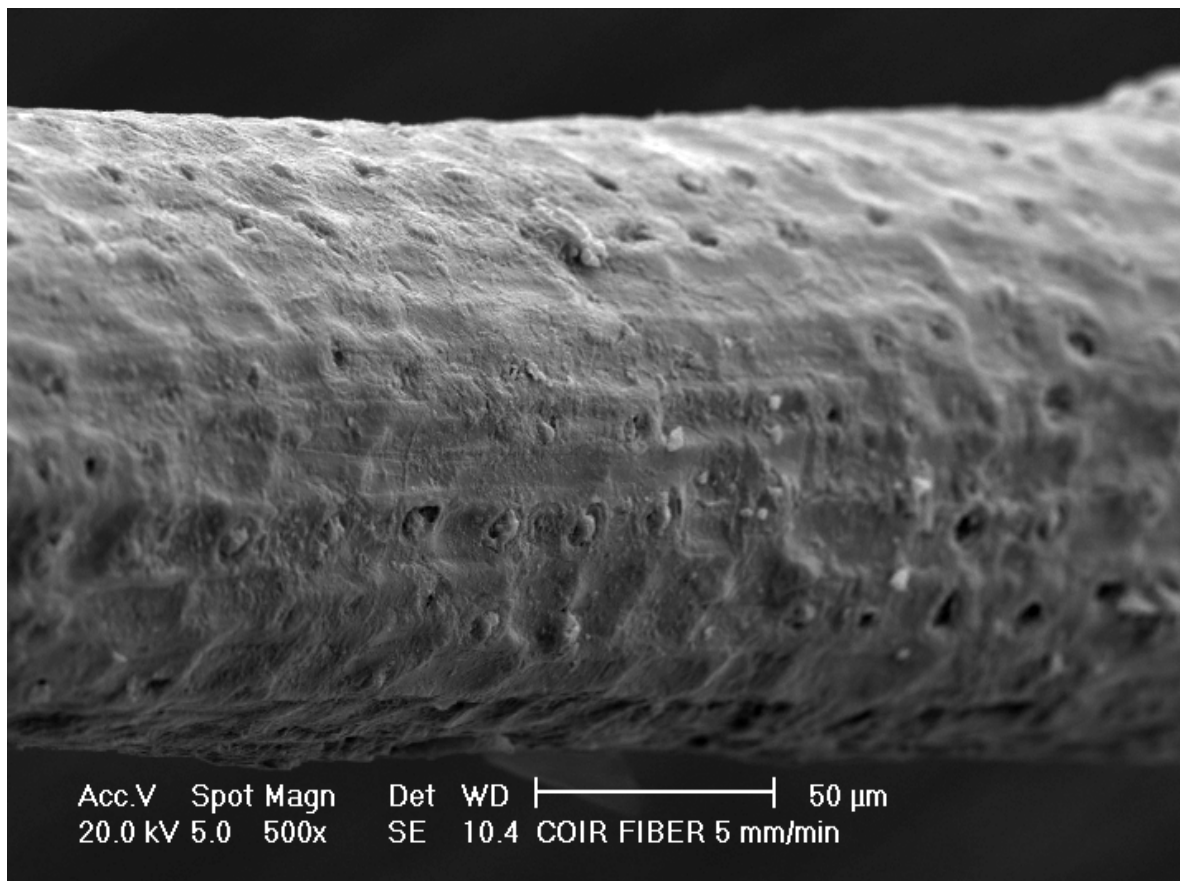
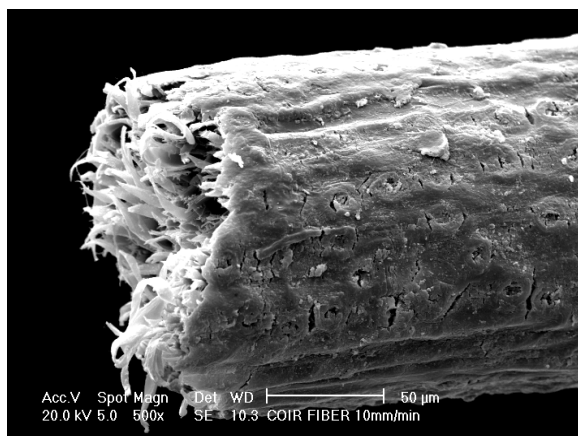
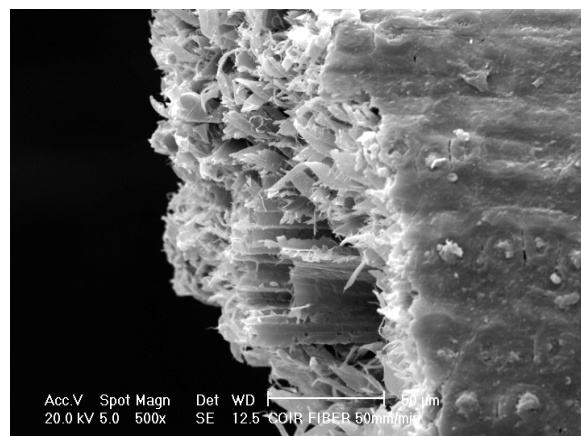


Figura 32: Microscopia eletrônica da superfície das fibras de coco



(a) 10mm/min



(b) 50mm/min

Figura 33: Microscopia eletrônica de fraturas das fibras a diferentes velocidades

4.1.4 Efeitos térmicos

A análise termogravimétrica da fibra de coco foi conduzida em atmosferas de oxigênio e nitrogênio, e as curvas estão ilustradas nas Figura 34 e Figura 35. Na Figura 36 está apresentada a análise dinâmico mecânica da fibra em seu estado natural e da fibra seca (após eliminação de água através de secagem em estufa a 60°C durante 4 horas).

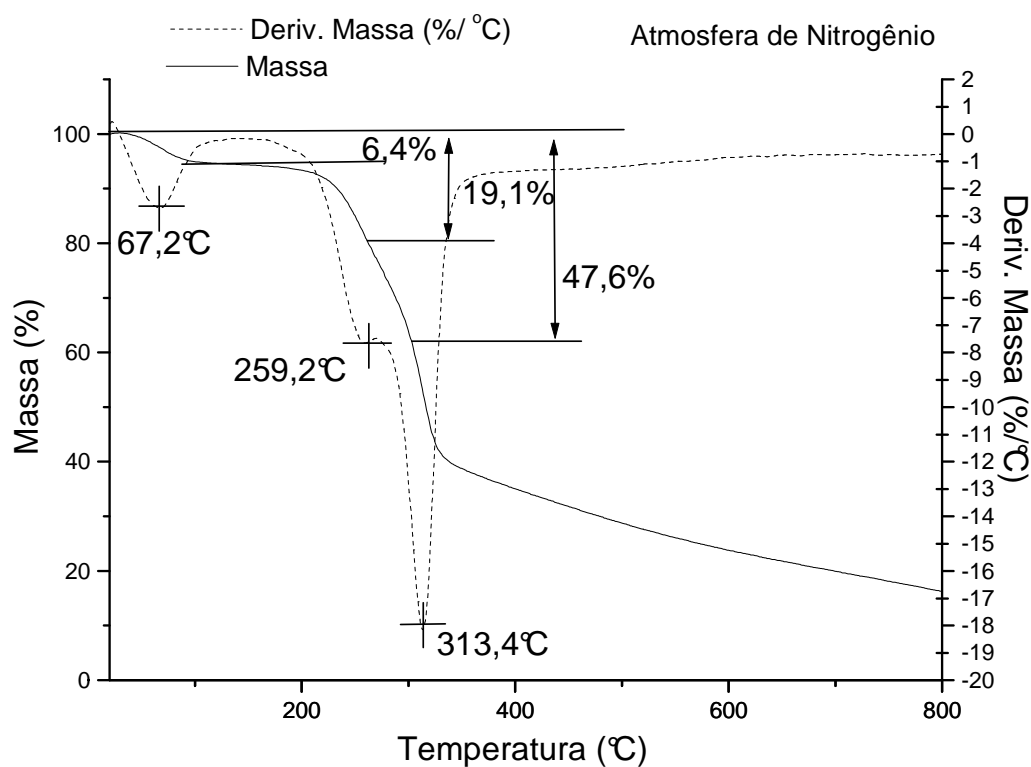


Figura 34: Curva termogravimétrica da fibra de coco em atmosfera de nitrogênio

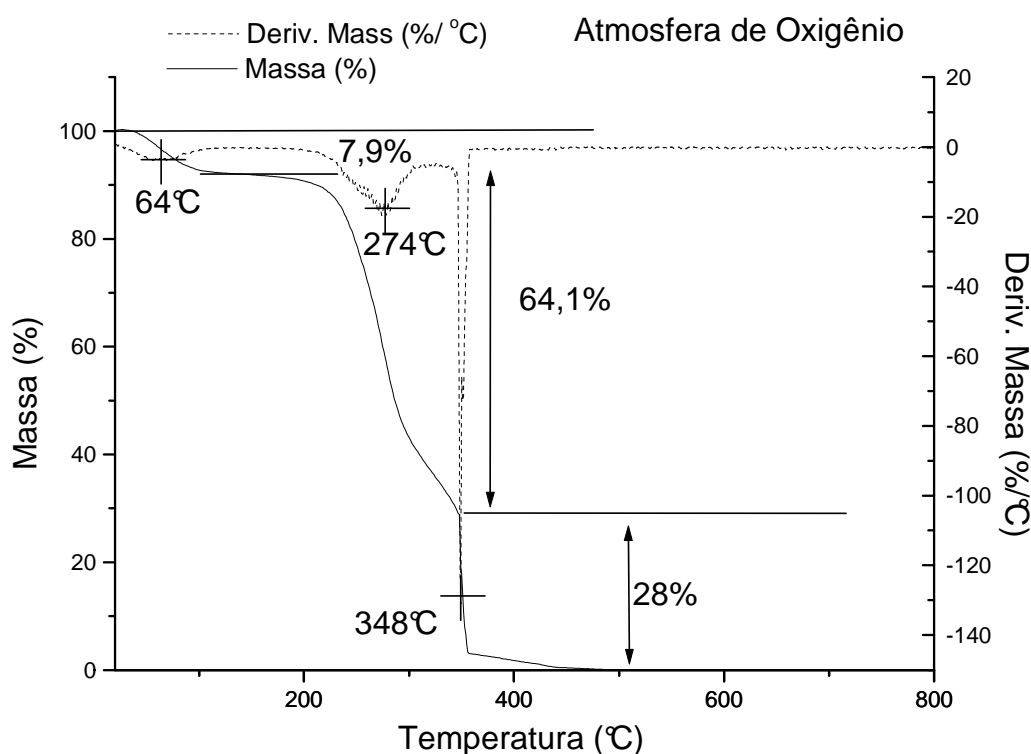


Figura 35: Curva termogravimétrica da fibra de coco em atmosfera de oxigênio

A análise térmica nos fornece informações a respeito da composição e estabilidade térmica. Em atmosfera inerte, a degradação inicial ocorre em torno de 200°C. Em atmosfera oxidante, a degradação ocorre de uma forma muito mais complexa. A perda de massa inicial em ambas condições são muito próximas, 6,4% em nitrogênio e 7,9% em oxigênio. Outras perdas de massa são observadas nas seguintes temperaturas: 259,2 e 313°C, com 19,1 e 47,6% para atmosfera de nitrogênio e 64,1 e 28% de perda de 64,1 e 28% em 274 e 348°C para atmosfera de oxigênio.

A perda de massa inicial entre a temperatura ambiente e 150°C pode ser atribuída a eliminação de água presente na fibra. A degradação inicial das fibras ocorre em torno de 200°C e 180°C para as atmosferas de nitrogênio e oxigênio. No processo de pirólise é possível identificar as regiões de degradação dos componentes das fibras. O primeiro pico de transição demonstra a degradação da hemicelulose, tipicamente entre 200 e 260°C, junto com a degradação da celulose, ocorre entre 240 e 250°C. Finalmente há a

degradação da lignina, entre 280 a 500°C. Entre os três componentes principais, a lignina é o componente mais difícil de degradar, devido a sua complexa estrutura [54, 55].

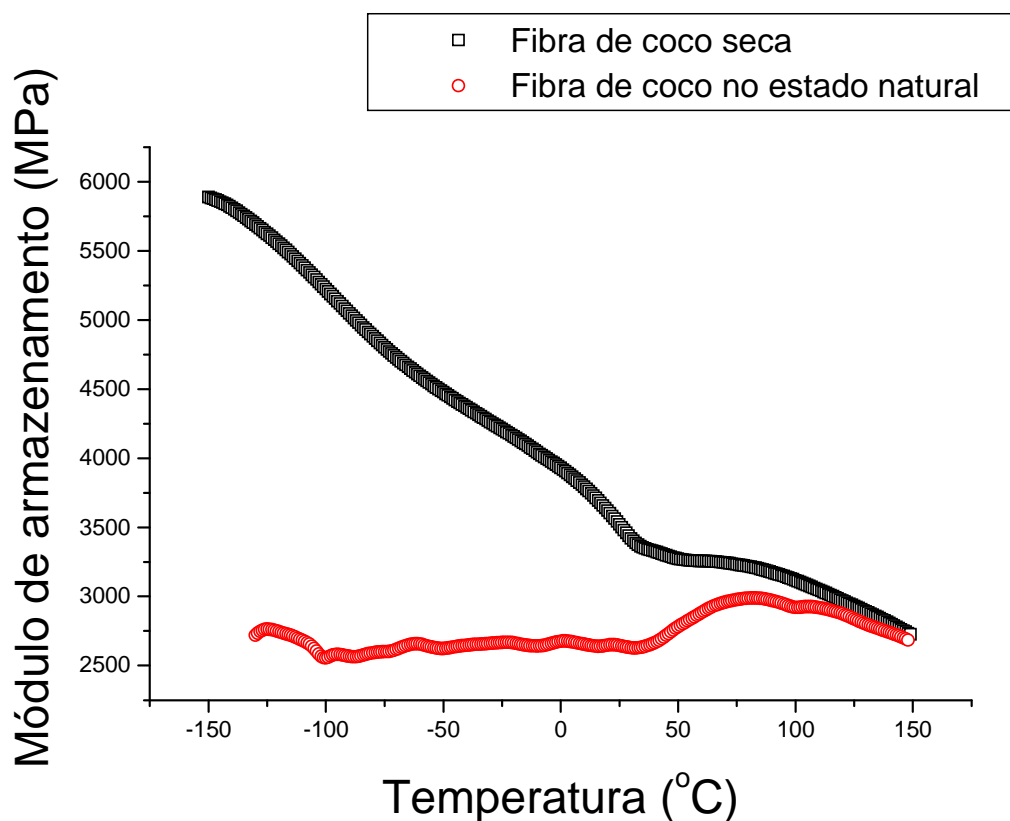


Figura 36: Análise dinâmico mecânica das fibras de coco (natural e após secagem)

A análise dinâmico mecânica das fibras fornece informações a respeito de seu comportamento mecânico com a variação de temperatura. O módulo de armazenamento diminui com o aumento da temperatura, apontando as transições térmicas da fibra de coco. Após a secagem da fibra, ocorre um aumento dos valores do módulo de armazenamento pela eliminação da água presente em sua estrutura. Avaliando os valores de módulo de armazenamento a 25°C, a fibra em seu estado natural apresenta um valor de 2.645MPa, próximo a valores de módulo elástico encontrados nos ensaios mecânicos de tração da fibra. Com a eliminação da água, o módulo de armazenamento a 25°C aumenta para 3.521MPa, representando um aumento de 30%.

4.1.5 Análise por infravermelho

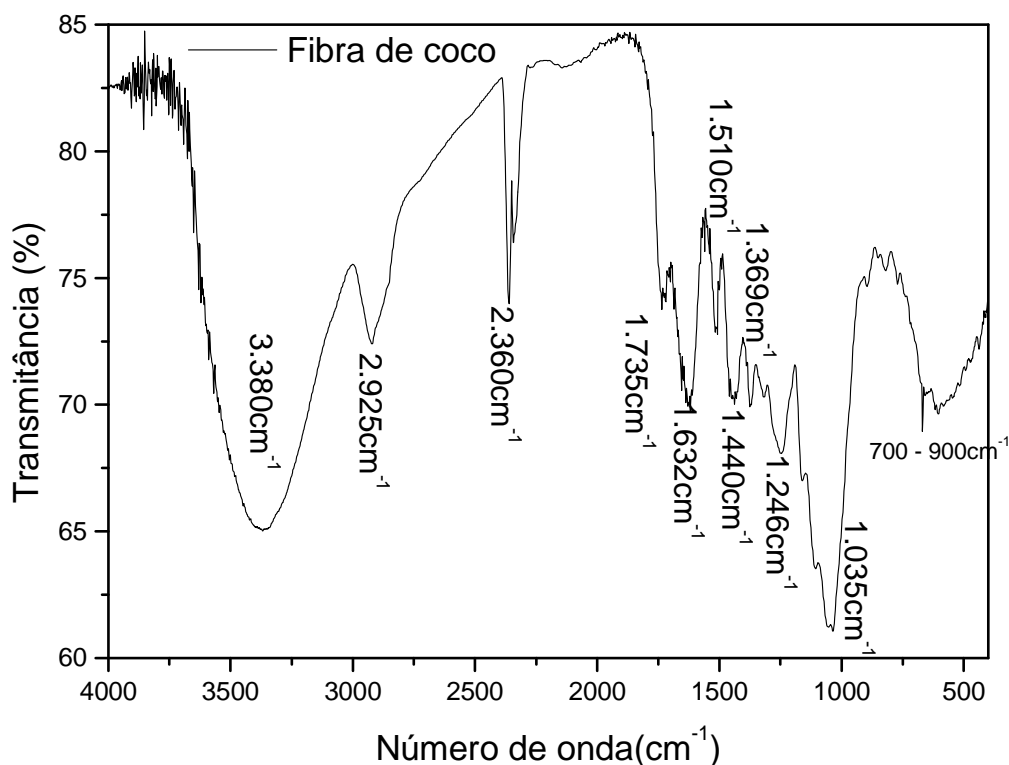


Figura 37: Espectro de infravermelho das fibras de coco

O espectro de infravermelho das fibras de coco mostra as bandas de absorção dos grupos característicos de seus constituintes: lignina, hemicelulose e celulose. Estes componentes são compostos de alcenos e grupos aromáticos, além de diferentes grupos funcionais contendo oxigênio, como ésteres, cetonas e álcool. As bandas de absorção destes componentes são observados em: -OH ($3400 - 3200\text{cm}^{-1}$), C=O ($1776-1715\text{cm}^{-1}$), C-O-C (1270cm^{-1}) e C-OH ($\sim 1050\text{cm}^{-1}$). A banda mais intensa atribuída para OH e C-O-C são encontrados para a celulose, enquanto que a hemicelulose apresenta fortes bandas C=O. Avaliando os componentes individualmente, a grande diferença é encontrada na região de ($1830 - 730\text{cm}^{-1}$). As bandas em 1100cm^{-1} da vibração de C-O-C e C-OH a $1060 - 1050\text{cm}^{-1}$ são referentes à cadeia da celulose surgem de componentes polisacarídeos. Outros picos devido ao grupo álcool da celulose aparecem a 1360 e 1320cm^{-1} . O espectro de FTIR da fibra de coco está apresentada na Figura 37, sendo similar a outras fibras [75, 85].

4.2 ESTUDO SOBRE AS FIBRAS DE CURAUÁ

4.2.1 Efeitos térmicos

As curvas de degradação das fibras de curauá estão observados na Figura 38 e Figura 39, sendo avaliadas as degradações em atmosfera de nitrogênio e oxigênio.

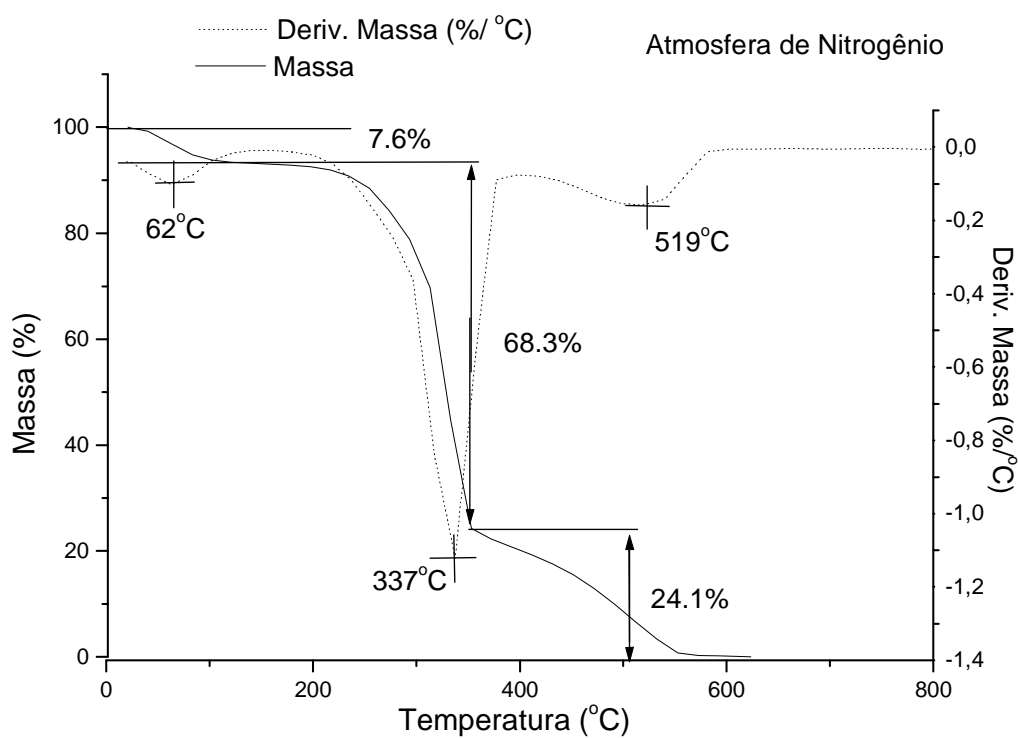


Figura 38: Curva termogravimétrica das fibras de curauá em atmosfera de nitrogênio

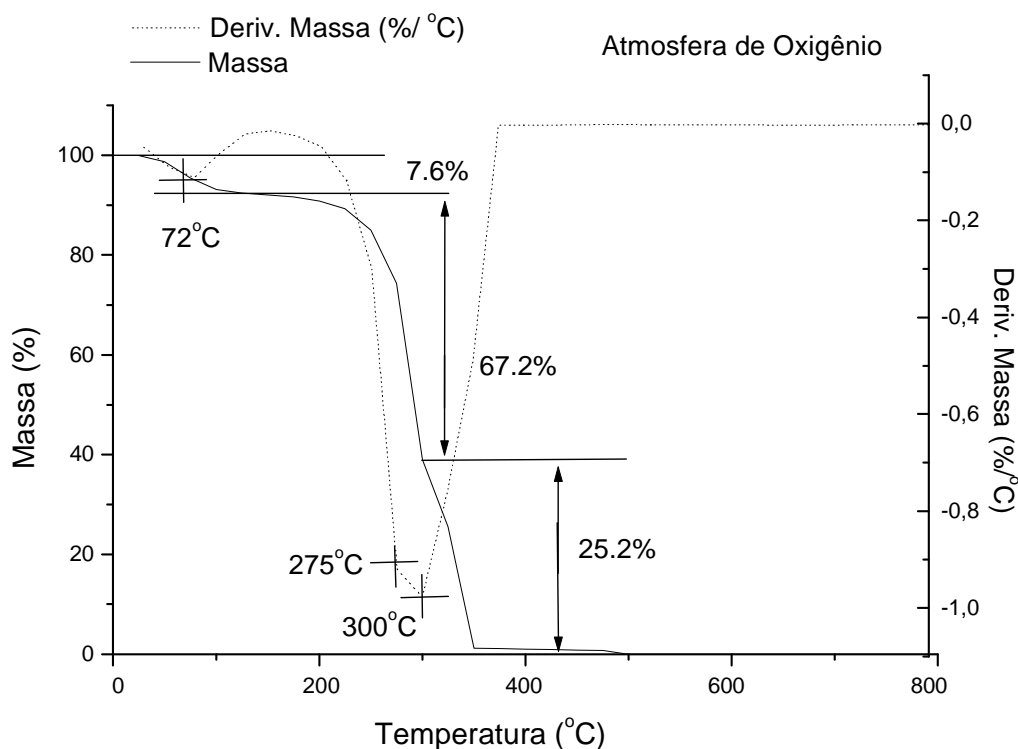


Figura 39: Curva termogravimétrica das fibras de curauá em atmosfera de oxigênio

Através da análise termogravimétrica é possível observar que em atmosfera inerte, uma perda de 7,6% de massa ocorre entre a temperatura ambiente e 200°C devido à eliminação de água das fibras. Após este processo, ocorrem dois degraus: 68,3% de perda de massa a 337°C e 24% a 519°C, representando a degradação dos constituintes das fibras: hemicelulose, celulose e lignina. No processo de pirólise das fibras é possível identificar os diferentes processos de degradação das fibras: o primeiro degrau na faixa de 200 a 290°C indica a degradação de hemicelulose, na faixa de 240 e 260°C indica a celulose e entre 280 e 500°C a lignina [54 , 55].

Em atmosfera oxidante não é possível separar os processos de degradação dos constituintes das fibras devido aos complexos processos de reação térmica. A curva de degradação térmica em atmosfera de oxigênio pode ser observada na Figura 39.

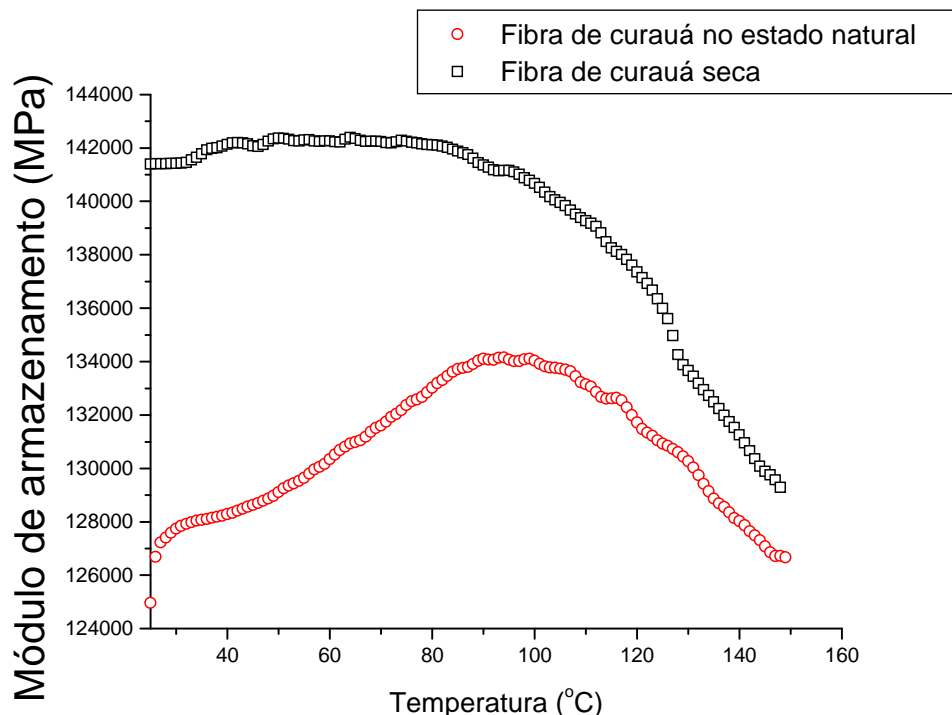


Figura 40: Análise dinâmico mecânica das fibras de curauá (estado natural e seca)

A análise dinâmico mecânica das fibras de curauá nas condições naturais e após secagem estão ilustradas na Figura 40. Com a fibra em seu estado natural, o módulo de armazenamento da fibra de curauá é afetado pela presença da água, que atua como um plastificante. À medida que a água é eliminada, o módulo de armazenamento aumenta de 128 a 134GPa na temperatura de 25°C, representando um aumento de 11 %. Este aumento do módulo elástico é causado pela eliminação da água, que aumenta a interação entre os grupos hidroxilas.

4.2.2 Difração de raios-X

O espectro de difração de raios-X da fibra de curauá está apresentado na Figura 41.

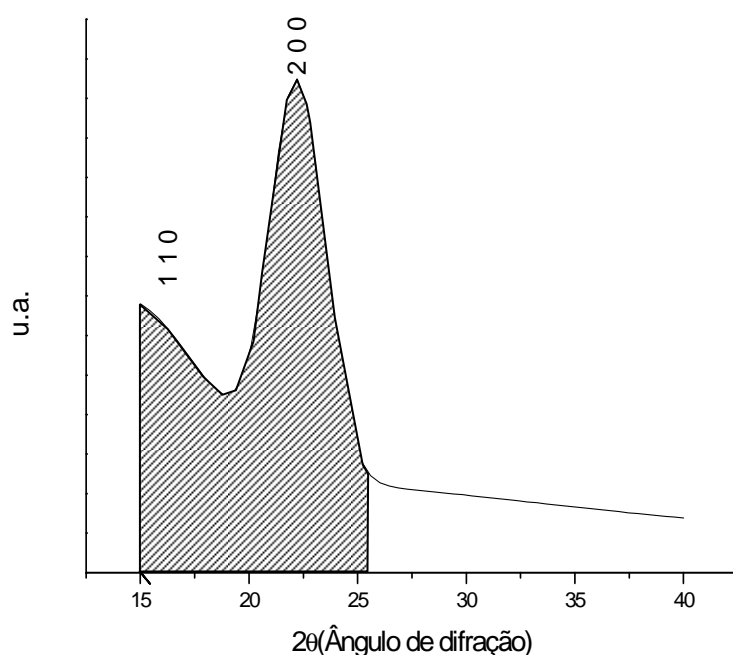


Figura 41: Difratoograma de raios-X da fibra de curauá

Seu espectro é similar ao de outras fibras, mostrando o pico cristalino da celulose ($2\theta=22^\circ$). O índice de cristalinidade para a fibra de curauá é de 50,2%, estimado pelo método da área, onde a cristalinidade é expressa pela razão entre a área total das regiões cristalinas e a área total do material (amorfo e cristalino) x 100. Calculando o tamanho do cristal de celulose no pico de difratograma (2 0 0), encontramos um valor de 11,2nm. Comparando com as fibras de coco, a fibra de curauá apresenta uma maior cristalinidade e um valor de tamanho de cristal de celulose maior.

4.2.3 Propriedades mecânicas das fibras de curauá

As propriedades mecânicas foram avaliadas através dos ensaios de tração-deformação a diferentes condições de ensaios. Curvas típicas obtidas para fibras com diferentes diâmetros estão apresentados na Figura 42. Estas curvas mostram um comportamento da fibra com baixa deformação (3 a 6%), além de um comportamento de fratura frágil.

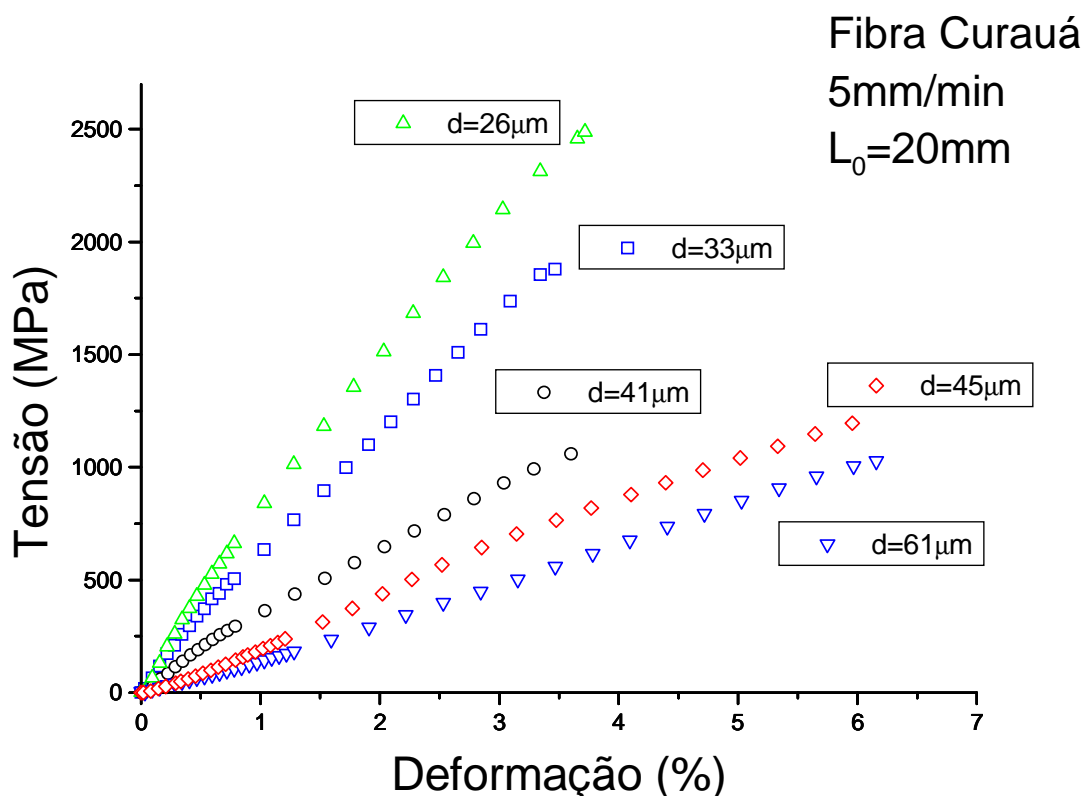


Figura 42: Curvas típicas de tensão-deformação para a fibra de curauá com diferentes diâmetros

O cálculo do módulo elástico e tensão de ruptura foram realizados através de software conforme descrito no capítulo 3. O módulo foi calculado a partir da região linear da curva, enquanto que a tensão de ruptura foi o maior valor encontrado nas curvas. O efeito do diâmetro nas propriedades mecânicas das fibras podem ser observadas nas Figura 43 e Figura 44. As condições de realização dos testes foram de 20mm de distância entre garras e a velocidade de $5\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Através dos gráficos é possível observar que tanto a tensão de ruptura quanto o módulo elástico diminuem com o aumento do diâmetro da fibra. O módulo elástico diminui de 96 a 30GPa, enquanto que a tensão de ruptura diminui de 310 a 131MPa com o aumento do diâmetro da fibra de 26 a 64μm. Este comportamento é observado em nas fibras de abacaxi e linho, mas contrário a fibras de banana, sisal, palmira (Índia), talipot e as próprias fibras de coco do Brasil.

As variações das propriedades mecânicas podem ser novamente explicadas em termos dos parâmetros estruturais das fibras, como variações no número de células, volume das células e número de defeitos.

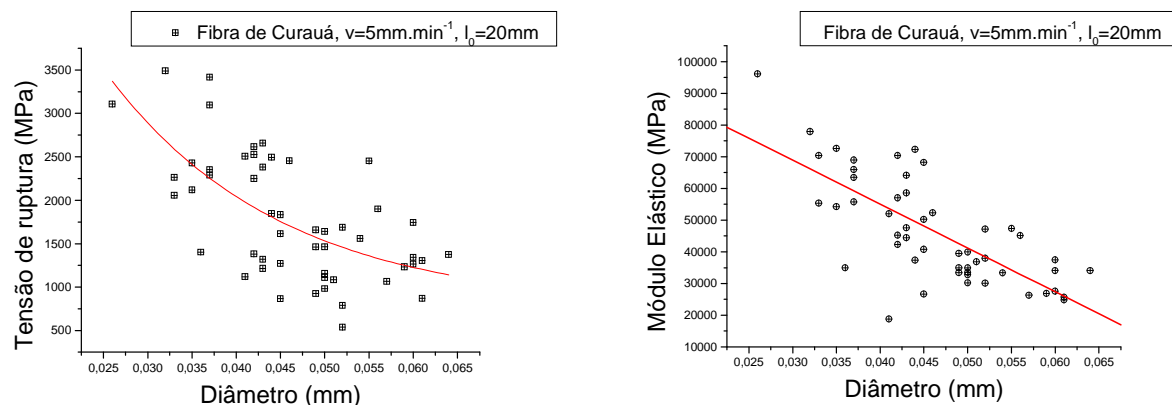


Figura 43: Influência das propriedade mecânicas (tensão de ruptura e módulo elástico) com o diâmetro das fibras de curauá

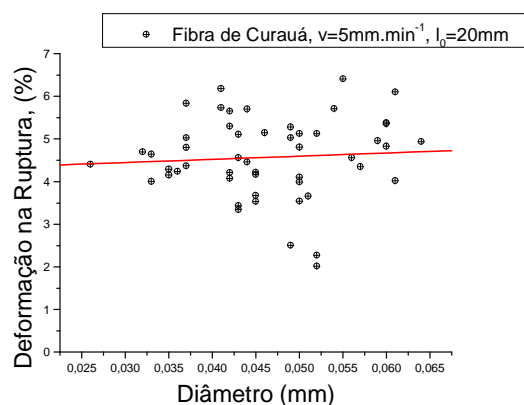


Figura 44: Influência do diâmetro nas propriedades mecânicas das fibras de curauá

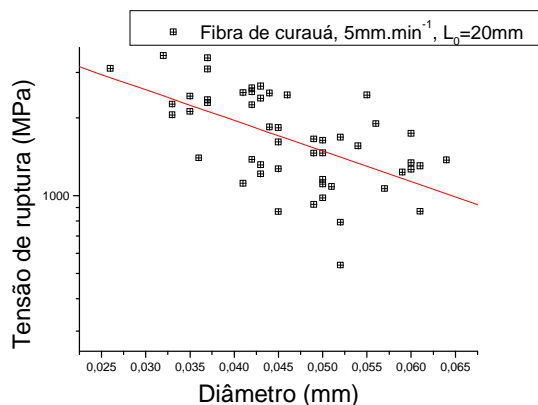


Figura 45: Influência das propriedade mecânicas (tensão de ruptura) com o diâmetro das fibras de curauá em escala Log

A tensão de ruptura em escala Log apresenta um comportamento linear com o diâmetro da fibra de curauá, conforme ilustrado na Figura 45.

As propriedades mecânicas das fibras podem ser descritos em função de parâmetros estruturais, como já descrito anteriormente. Para calcular o ângulo helicoidal, usamos a correlação entre a deformação e o ângulo, dada por [63]:

$$\varepsilon = -2,78 + 7,28 \cdot 10^{-2} \cdot \theta + 7,7 \cdot 10^{-3} \cdot \theta^2 \quad (\text{Equação 17})$$

O ângulo encontrado foi de 15° , valor menor que valores reportados na revisão da literatura ($18,8^\circ$). Esta diferença pode ser descrita em termos das diferenças de condições de ensaios. Através do ângulo helicoidal, é possível calcular o módulo de Young efetivo da fibra, E_f , dado por:

$$E_{f'} = W_C \cdot E_C \cdot \cos^2 \theta + W_{NC} \cdot E_{NC} \quad (\text{Equação 18})$$

O módulo de Young efetivo da fibra foi calculado como 31,1GPa, na mesma ordem dos valores experimentais obtidos.

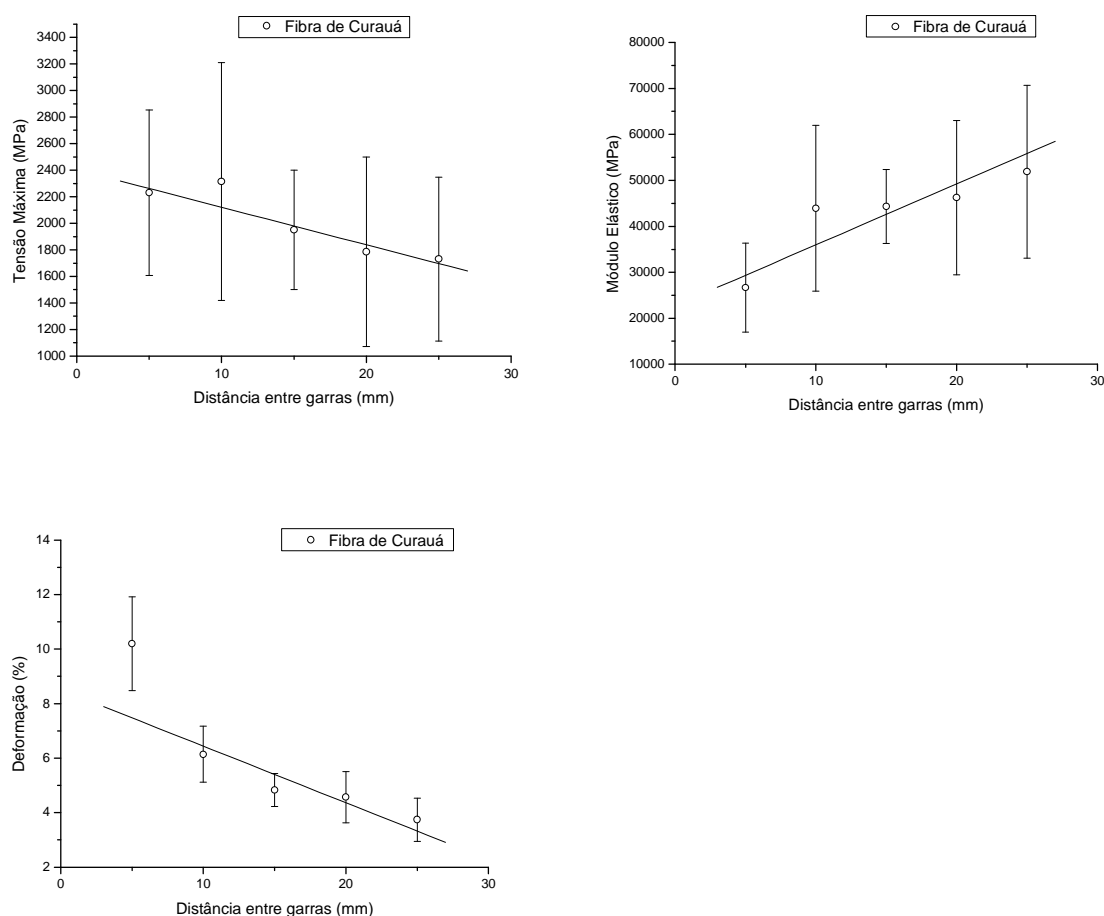


Figura 46: Influência da distância entre garras nas propriedades mecânicas das fibras de curauá

Para verificar a influência da distância entre garras, as propriedades das fibras de curauá foram avaliadas variando de 5 a 25mm, com diâmetro médio de $46\mu\text{m}$, na velocidade de $5\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Os resultados estão ilustrados na Figura 46. Observa-se que tanto o módulo elástico quanto a deformação na ruptura diminuem com o aumento da distância entre garras. A tensão de ruptura diminui de 223 a 173MPa e a deformação de 10,2 a 3,74%. O módulo elástico médio aumenta (de 26,6 a 52,9GPa) com o aumento da distancia entre garras. A redução dos valores de tensão de ruptura e alongamento na ruptura é aceitável devido ao maior número de defeitos presentes na fibra com o aumento da distância entre garras. Este comportamento é encontrado em outras fibras naturais.

Fazendo a regressão linear entre a tensão de ruptura e a distância entre garras encontramos a seguinte equação:

$$\sigma = 2.460 - 152,8.L \text{ (Equação 19)}$$

O coeficiente de correlação para esta equação é de 0,85. De acordo com a literatura, a inclinação da curva é denominada de densidade de ligações fracas (weak link density) e foi calculado como $152,8 \text{ MN.m}^{-3}$, valor extremamente baixo se comparado com os valores encontrados na literatura. Valores altos sugerem a presença de muitos defeitos nas fibras, provavelmente causados pelo processamento. Outro fator que colabora com esta informação é que a deformação na ruptura aumenta com a distância entre garras. Isso indica que quanto maior a distância entre garras, maior será a quantidade de defeitos, contribuindo para uma menor deformação na ruptura.

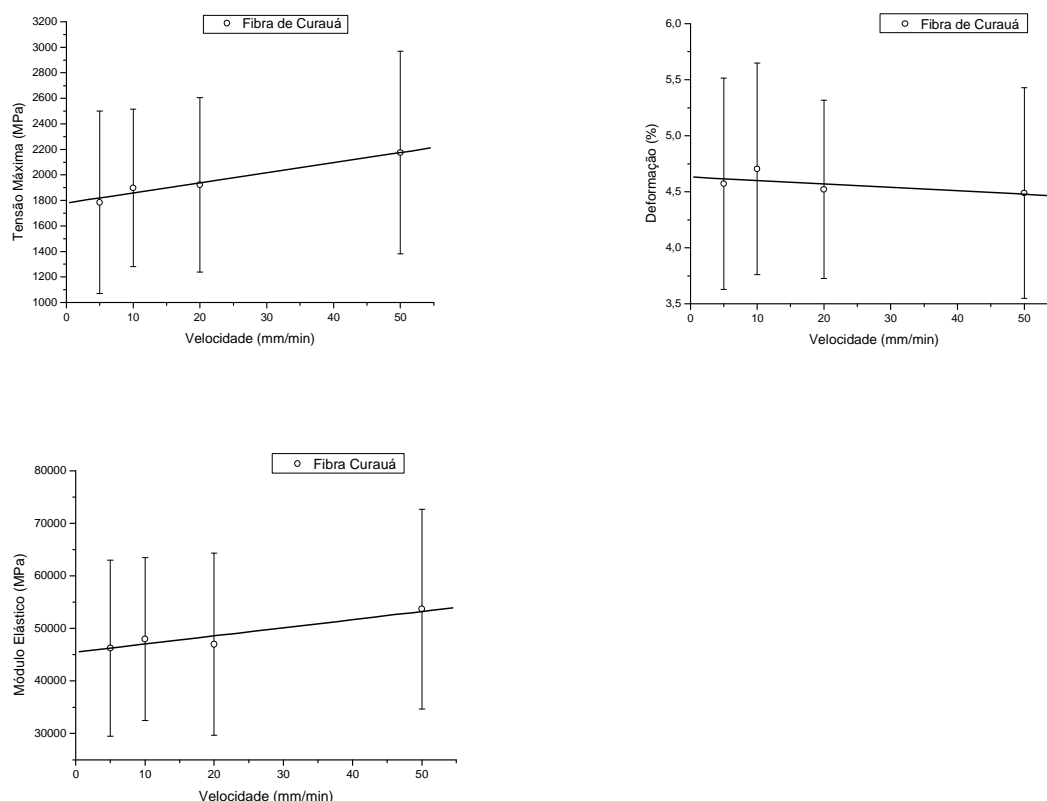


Figura 47: Variação das propriedades mecânicas do curauá em função da velocidade de ensaio

Na Figura 47 são apresentadas as variações das propriedades mecânicas em função de diferentes velocidades de ensaio. Nos gráficos são observados que com o aumento da velocidade de 5 para 50 mm.min⁻¹ há um aumento na tensão de ruptura de 1.784,6 para 2.174,7 MPa. Os valores de módulo elástico (média de 48,7 GPa) e de alongamento na ruptura (média de 4,6%) não sofrem variação com a velocidade de ensaio. Este comportamento é observado em outras fibras naturais (sisal) e podem ser explicados em termos do comportamento viscoelástico dos materiais poliméricos. Quanto maior a velocidade de ensaio, as regiões cristalinas das fibras participam mais na divisão da tensão aplicada resultando no aumento da região cristalina. Como a fibra de curauá apresenta uma cristalinidade em torno de 50%, existe a possibilidade da fibra apresentar um comportamento viscoelástico a altas

velocidades de deformação. Este fato não implica na variação do módulo elástico ou deformação na ruptura com o aumento da velocidade.

Todos os resultados da caracterização mecânica das fibras de curauá obtidos neste trabalho estão apresentados no Anexo I.

4.2.4. Morfologia das fibras de curauá

Após os testes mecânicos, foram realizadas análises microscópicas das fraturas das fibras. Observando as fraturas das fibras, Figura 48, o comportamento é de uma fratura frágil com saca-fibras (“pull-out”) das microfibrilas. Este comportamento é observado independentemente da velocidade de teste.

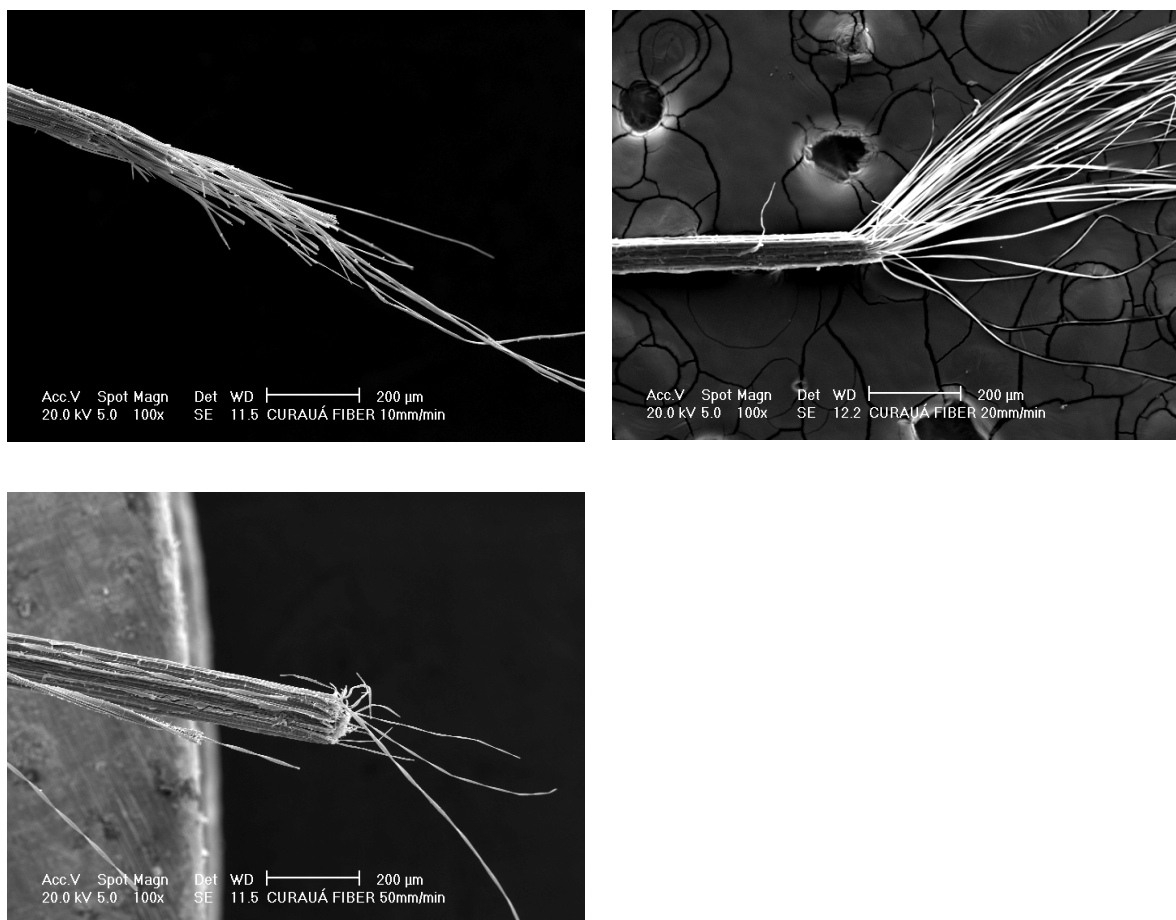


Figura 48: Microscopias das fraturas das fibras de curauá a diferentes velocidades de ensaio

Através da análise da superfície das fibras de curauá é possível observar que as fibras apresentam imperfeições na sua superfície (Figura 49).

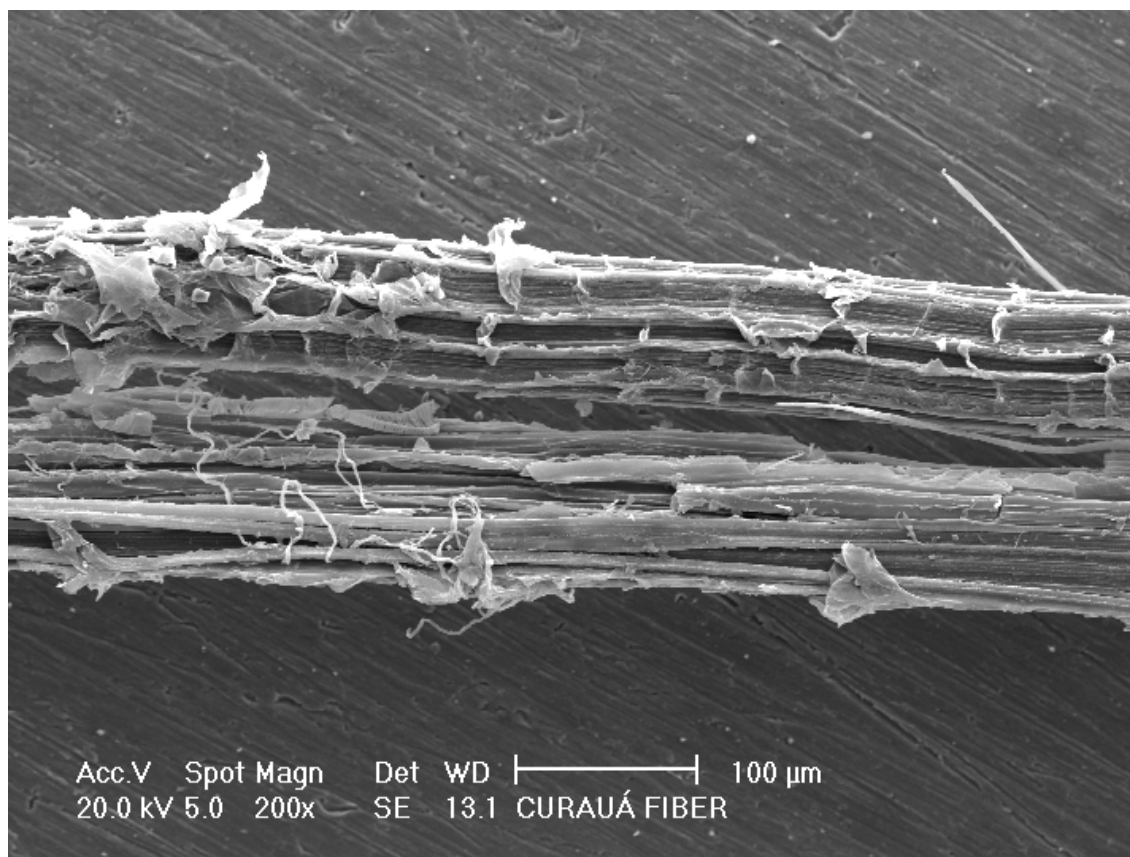


Figura 49: Superfície da fibra de curauá

4.2.5. Análise por Infravermelho

O espectro de infravermelho da fibra de curauá está ilustrado na Figura 50, sendo similar ao espectro obtido para o coco e outras fibras naturais. O espectro de infravermelho demonstra o espectro dos constituintes das fibras (celulose, hemicelulose e lignina) [75, 85].

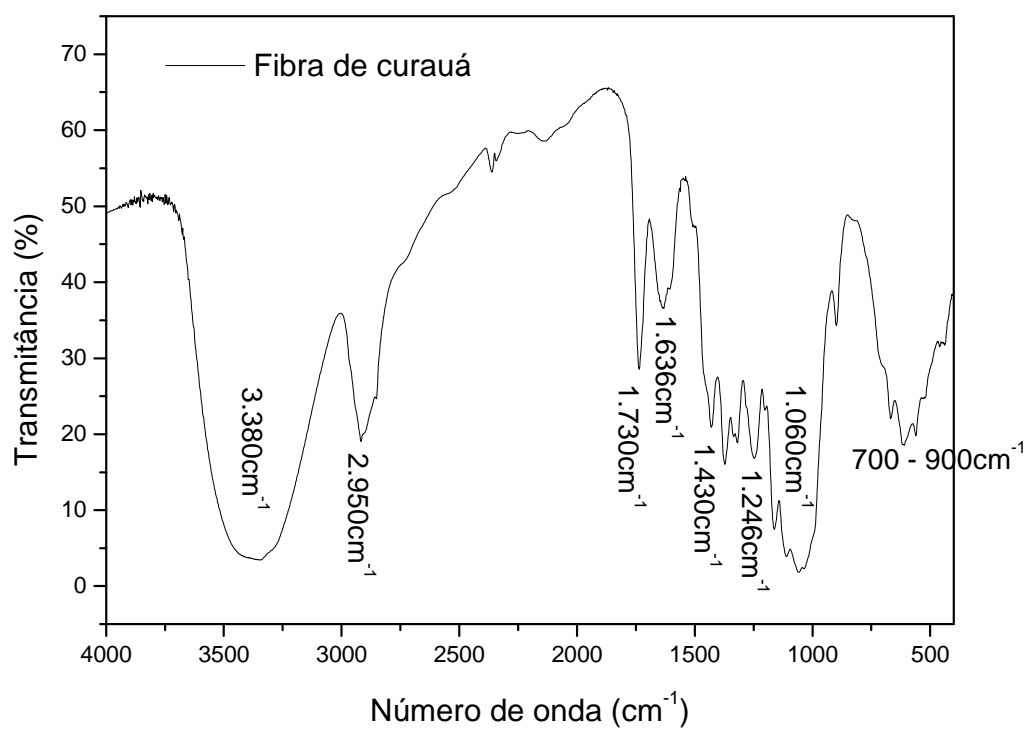


Figura 50: Espectro de infravermelho das fibras de curauá

4.3 MODELAGEM DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS FIBRAS COM RNA

As propriedades mecânicas das fibras de coco e curauá foram simuladas através de RNA com o emprego do software Pythia. Houve uma separação aleatória dos dados experimentais em dois grupos: dados para treinamento e dados para teste. Foram definidos como sinais de entrada: ângulo helicoidal, quantidade de celulose, cristalinidade da fibra, velocidade do teste, distancia entre garras, diâmetro das fibras, além das propriedades mecânicas (tensão de ruptura, deformação na ruptura e módulo elástico). As propriedades de saída foram as próprias propriedades mecânicas. Para cada propriedade mecânica foi criada uma RNA.

4.3.1 Simulação do módulo elástico através de RNA

Os dados referentes aos testes de tração x deformação das fibras de coco e curauá foram divididos em dois grupos, sendo 70% dos dados para treinamento e 30% para sua verificação. A rede neural determinou os valores dos pesos para cada interação, O critério de erro fixado para a diferença entre os valores experimentais e os valores modelados foi fixado em 1%. O modelo empregado para a RNA está apresentado na Figura 51.

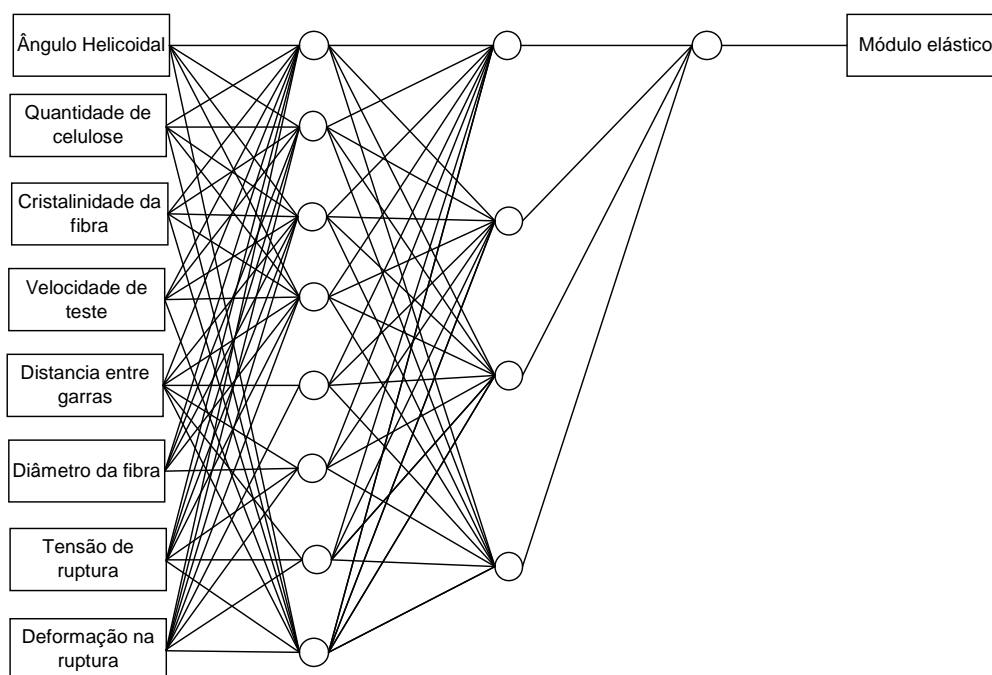


Figura 51: Esquema de RNA empregada para a simulação do módulo elástico das fibras

Após a simulação do módulo elástico, foram realizados os gráficos comparando os dados experimentais com os dados da simulação. Na Figura 52 está apresentada a influência do módulo elástico com o diâmetro para as fibras de curauá. A correlação encontrada entre os dados experimentais e os dados da simulação foi de 91,25%. Na Figura 53 é apresentada a relação do módulo elástico com a distancia entre garras. Neste caso, o coeficiente de correlação foi de 99,55%. Na Figura 54 são apresentados os módulo elástico em função da velocidade de ensaio com uma correlação de 94,79%.

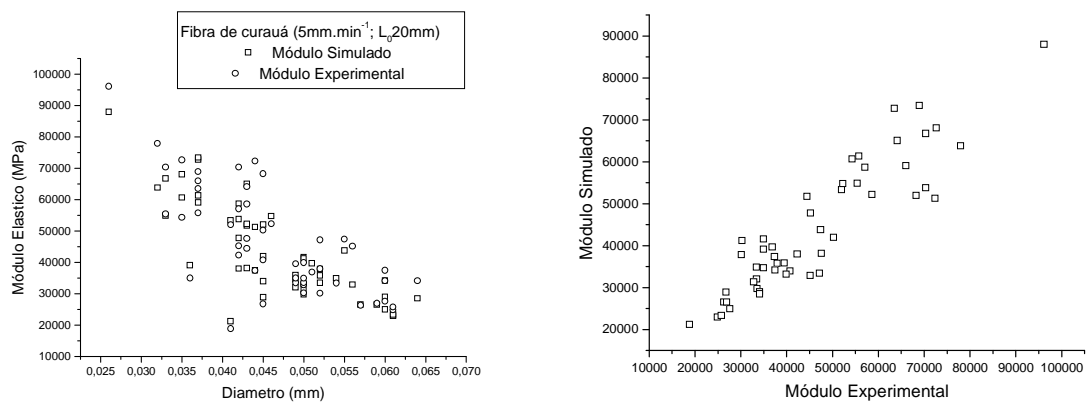


Figura 52: Influência do diâmetro nos valores experimentais e simulados de módulo elástico para as fibras de curauá (5mm.min⁻¹; L₀: 20mm)

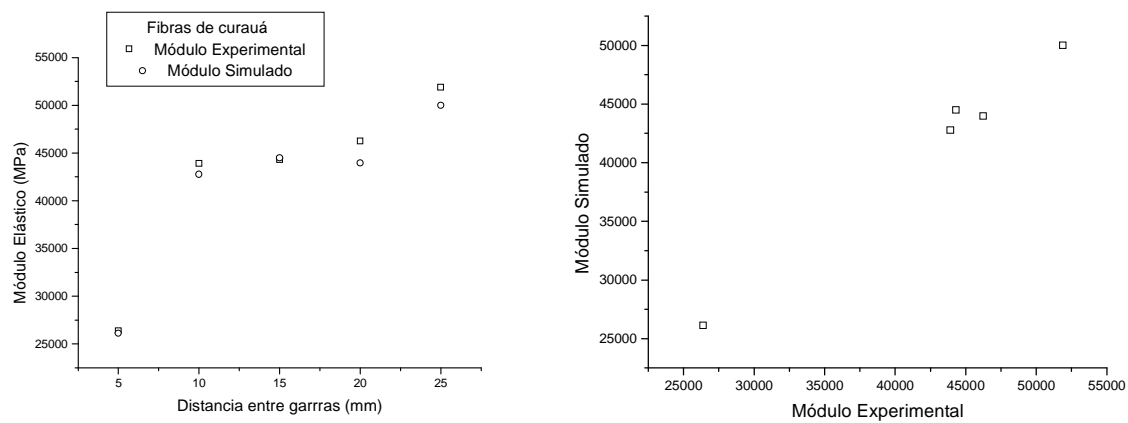


Figura 53: Influência da distância entre garras para os valores experimentais e simulados de módulo elástico para as fibras de curauá (L₀: 20mm)

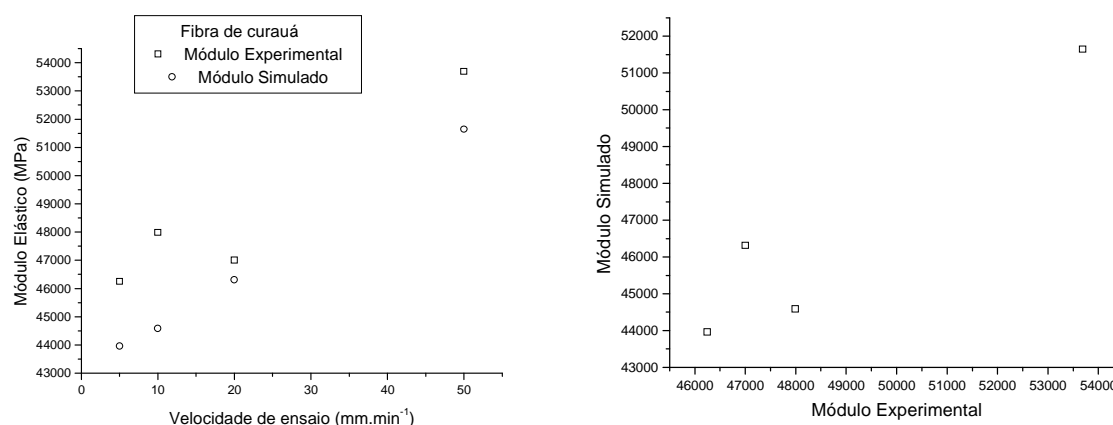


Figura 54: Influência da velocidade para os valores experimentais e simulados de módulo elástico para as fibras de curauá

Para as fibras de coco, a influência do diâmetro no módulo elástico está apresentado na Figura 55, com um coeficiente de correlação de 95,19%. Na Figura 56 está a relação de módulo em função da distância entre garras, com 99,86% de correlação e na Figura 57 está ilustrado o módulo em função da velocidade de ensaio (98,70% de correlação).

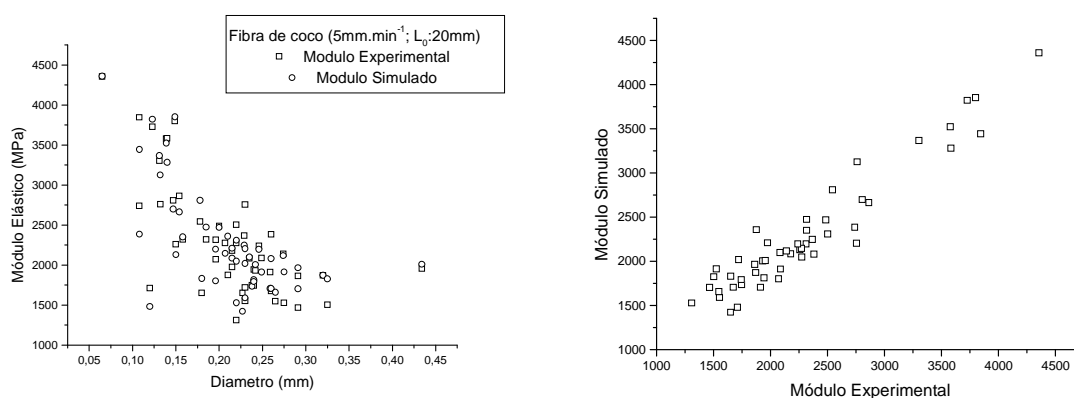


Figura 55: Influência do diâmetro nos valores experimentais e simulados de módulo elástico para as fibras de coco (5mm.min⁻¹; L₀: 20mm)

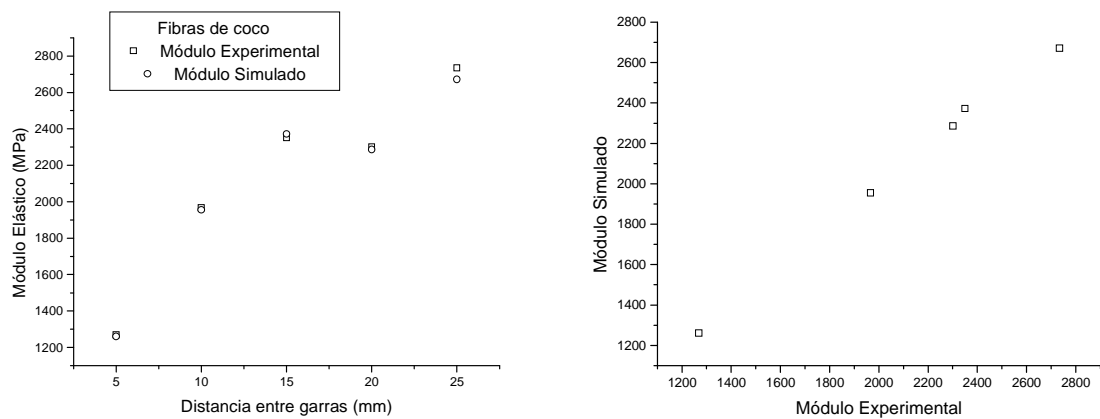


Figura 56: Influência da distância entre garras para os valores experimentais e simulados de módulo elástico para as fibras de coco (L_0 : 20mm)

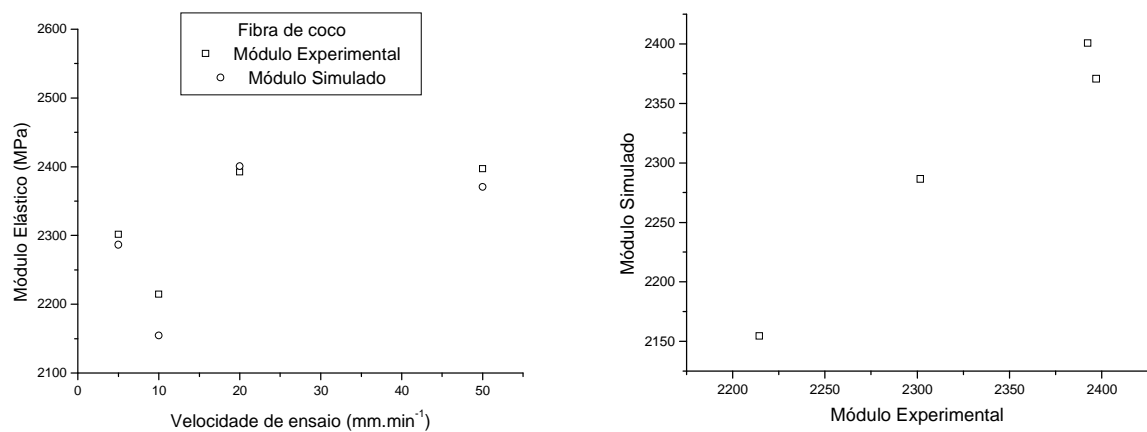


Figura 57: Influência da velocidade para os valores experimentais e simulados de módulo elástico para as fibras de coco

Na Tabela 8 e Tabela 9 estão apresentados um resumo dos resultados obtidos na simulação através da RNA.

Tabela 8: Resumo dos resultados de módulo elástico experimental e simulado para as fibras de coco

Fibra	Velocidade (mm,min ⁻¹)	Distancia entre garras (mm)	Módulo Elástico Experimental (GPa)	Módulo Elástico Simulado (GPa)
Coco	5	5	1,27	1,26
		10	1,97	1,95
		15	2,35	2,37
		20	2,30	2,29
		25	2,73	2,67
	10	20	2,21	2,15
	20	20	2,39	2,40
	50	20	2,40	2,37

Tabela 9: Resumo dos resultados de módulo elástico experimental e simulado para as fibras de curauá

Fibra	Velocidade (mm,min ⁻¹)	Distancia entre garras (mm)	Módulo Elástico Experimental (GPa)	Módulo Elástico Simulado (GPa)
Curauá	5	5	26,39	26,12
		10	43,91	42,76
		15	44,32	44,49
		20	46,25	43,96
		25	51,89	50,00
	10	20	47,99	44,59
	20	20	47,00	46,31
	50	20	53,69	51,64

4.3.2 Simulação da tensão de ruptura através de RNA

Na Figura 59 está apresentada a RNA para simulação do módulo elástico das fibras. Os resultados estão descritos abaixo. Na Figura 59 é apresentado os valores de tensão de ruptura em função do diâmetro das fibras de curauá. A correlação entre os valores experimentais e simulados foi de 90,58%. Na Figura 60 estão ilustrados os valores de tensão de ruptura em função da distância entre garras. A correlação entre os dados experimentais e simulados foi de 99,43%. Na Figura 61 estão os resultados da tensão de ruptura em função da velocidade de ensaio, com correlação de 98,72%.

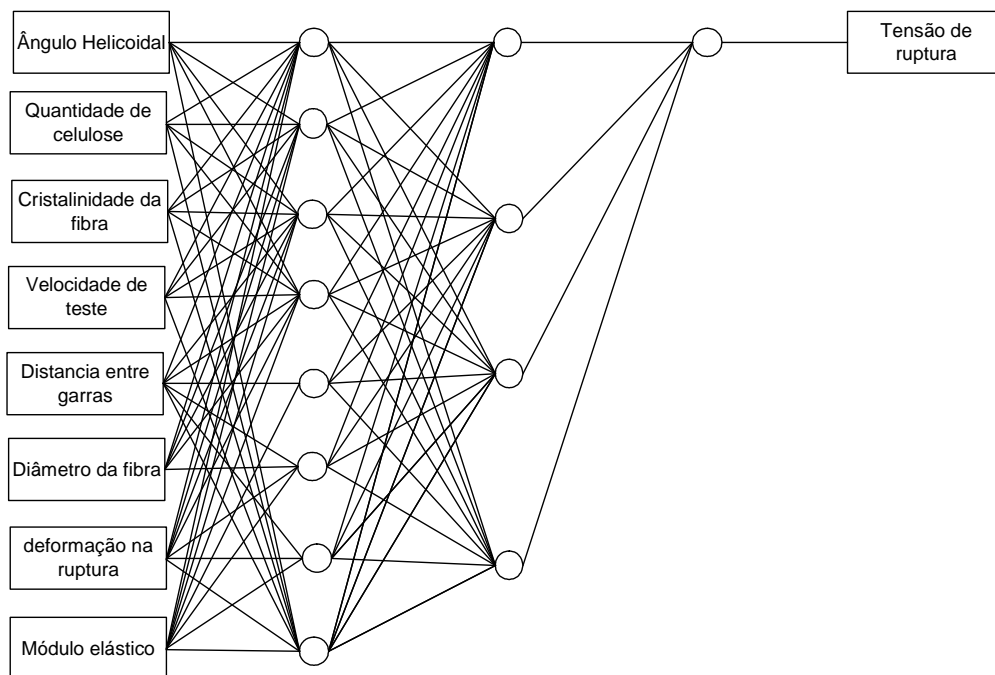


Figura 58: Esquema de RNA empregada para a simulação da tensão de ruptura das fibras

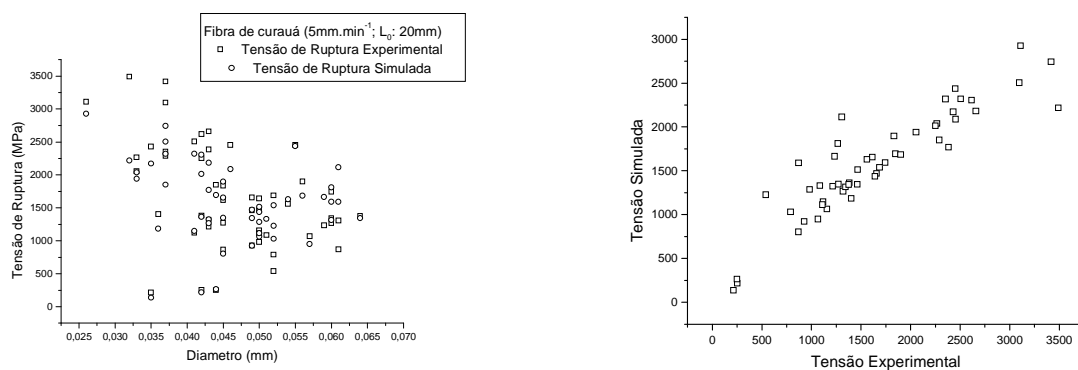


Figura 59: Influência do diâmetro nos valores experimentais e simulados de tensão na ruptura para as fibras de curauá ($5\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$; L_0 : 20mm)

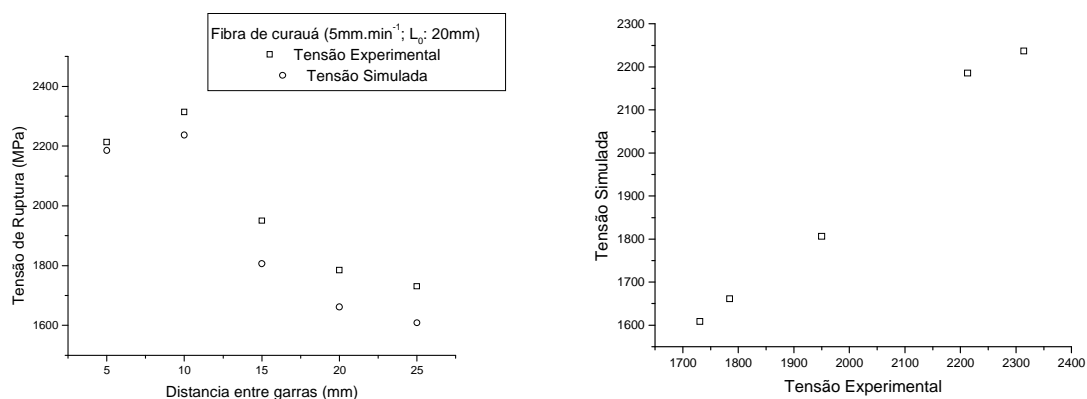


Figura 60: Influência da distância entre garras para os valores experimentais e simulados de tensão na ruptura para as fibras de curauá (L₀: 20mm)

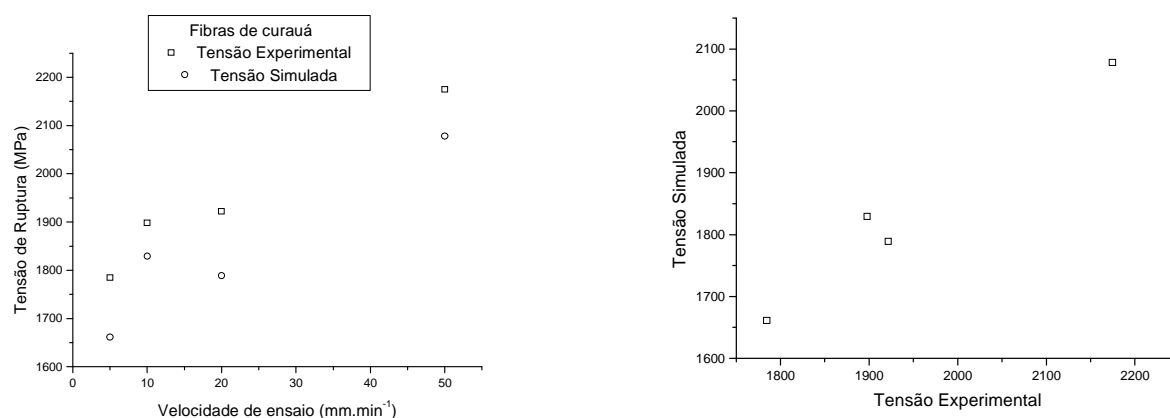


Figura 61: Influência da velocidade para os valores experimentais e simulados de tensão na ruptura para as fibras de curauá

As fibras de coco apresentam resultados semelhantes. Na Figura 62 está ilustrada a influência do diâmetro nos valores de tensão de ruptura com uma correlação de 93,70%. Na Figura 63, está a influência da distância entre garras, com 98,90% de correlação e na Figura 64 estão os valores de tensão em função da velocidade de teste, com correlação de 99,10%. Um resumo com os dados estão presentes nas Tabela 10 e Tabela 11.

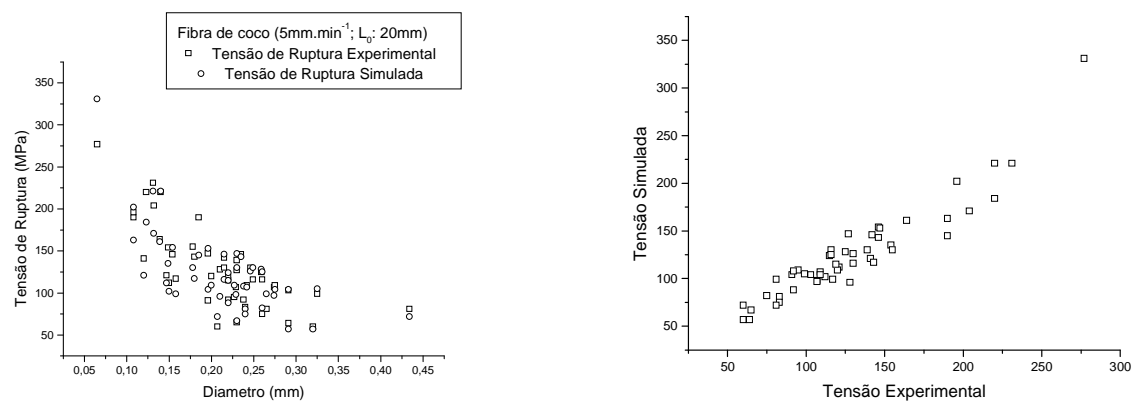


Figura 62: Influência do diâmetro nos valores experimentais e simulados de tensão na ruptura para as fibras de coco (5mm.min⁻¹; L₀: 20mm)

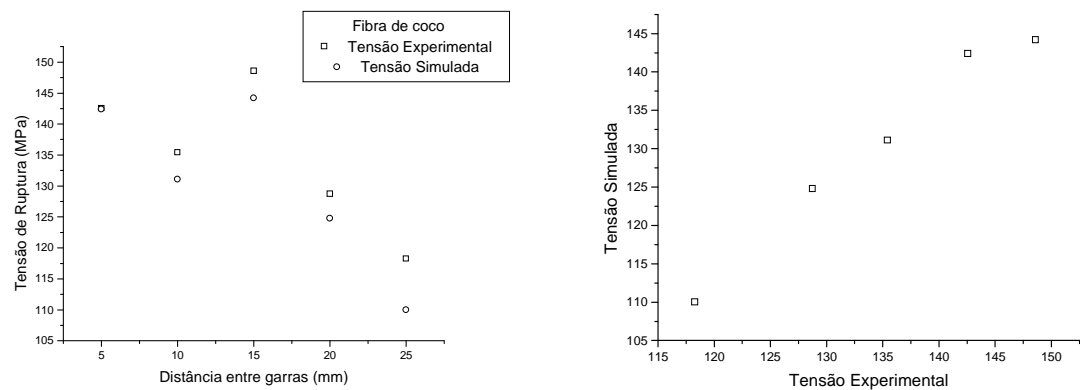


Figura 63: Influência da distância entre garras para os valores experimentais e simulados de tensão na ruptura para as fibras de coco (L₀: 20mm)

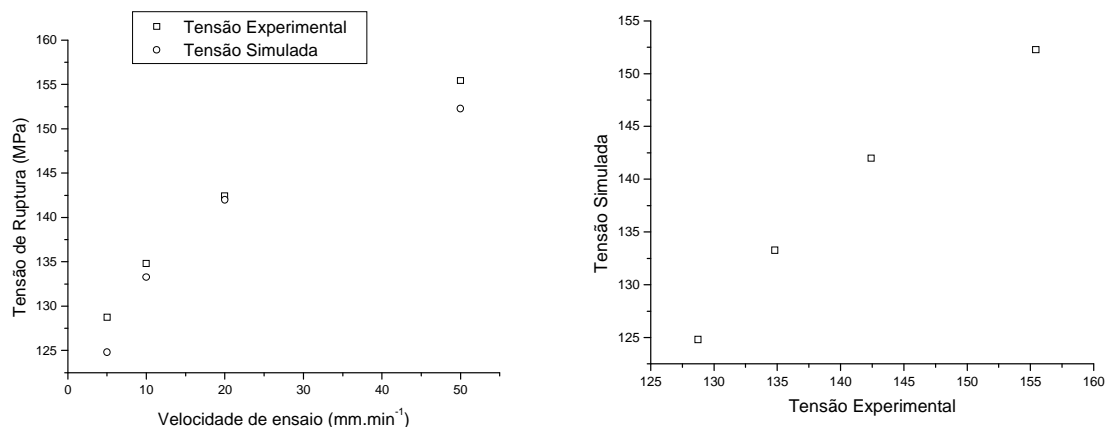


Figura 64: Influência da velocidade para os valores experimentais e simulados de tensão na ruptura para as fibras de coco

Tabela 10: Resumo dos resultados de tensão de ruptura experimental e simulado para as fibras de coco

Fibra	Velocidade (mm,min ⁻¹)	Distancia entre garras (mm)	Tensão de Ruptura Experimental (MPa)	Tensão de Ruptura Simulada (MPa)
Coco	5	5	142,57	142,40
		10	135,43	131,12
		15	148,60	144,20
		20	128,74	124,80
		25	118,27	110,04
	10	20	134,80	133,27
	20	20	142,42	141,98
	50	20	155,43	152,27

Tabela 11: Resumo dos resultados de tensão de ruptura experimental e simulado para as fibras de curauá

Fibra	Velocidade (mm,min ⁻¹)	Distancia entre garras (mm)	Tensão de Ruptura Experimental (MPa)	Tensão de Ruptura Simulada (MPa)
Curauá	5	5	2.213,00	2.185,23
		10	2.314,00	2.236,81
		15	1.950,05	1.806,16
		20	1.784,59	1.661,35
		25	1.730,61	1.608,25
	10	20	1.898,04	1.829,12
	20	20	1.921,82	1.788,80
	50	20	2.174,67	2.077,92

4.4.3 Simulação da deformação na ruptura através de RNA

Os dados de deformação na ruptura foram calculados através de RNA utilizando como parâmetros de entrada o ângulo helicoidal, quantidade de celulose, cristalinidade da fibra, velocidade de teste, distância entre garras, diâmetro da fibra, tensão de ruptura e módulo elástico (Figura 66). Os resultados estão descritos a seguir. Na Figura 66 está apresentada a deformação na ruptura em função do diâmetro das fibras de curauá. A correlação encontrada foi de 92,25%. Figura 67 ilustra a influência da distância entre garras na deformação na ruptura, com correlação de 99,79% e Figura 68 ilustra a influência da velocidade de teste, com 96,63% de correlação.

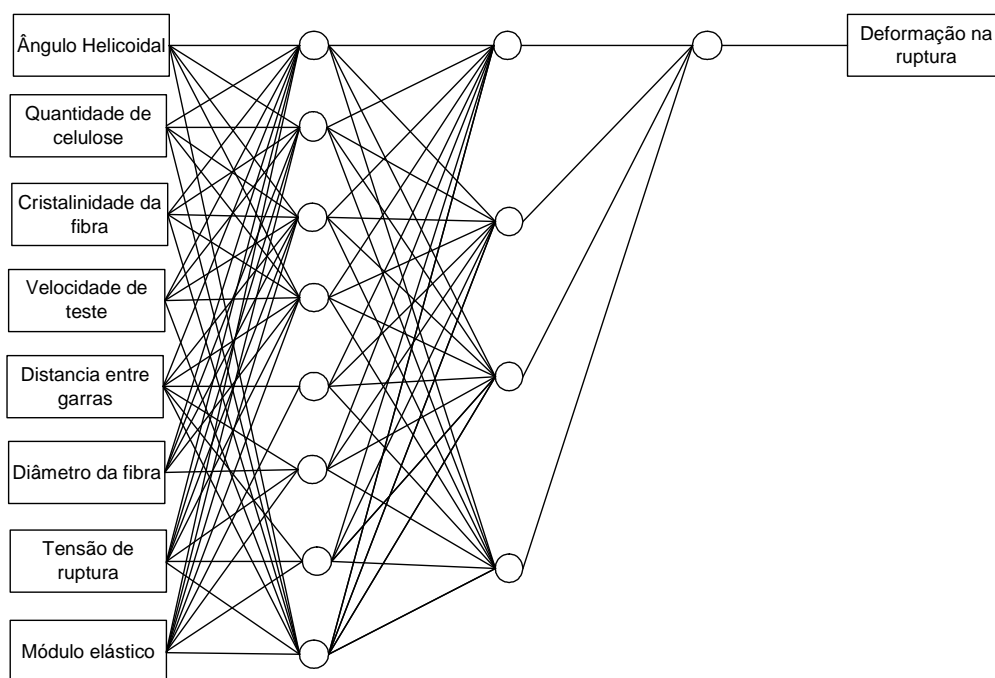


Figura 65: Esquema de RNA empregada para a simulação da deformação de ruptura das fibras

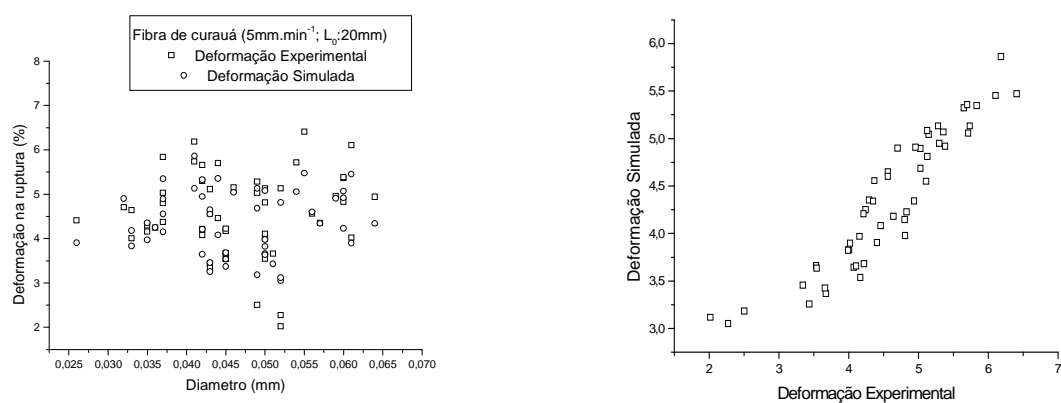


Figura 66: Influência do diâmetro nos valores experimentais e simulados de deformação na ruptura para as fibras de curauá ($5\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$; $L_0: 20\text{mm}$)

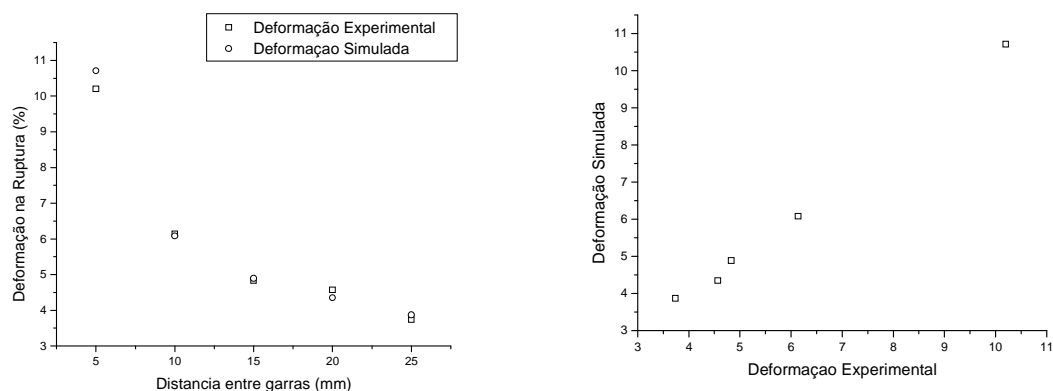


Figura 67: Influência da distância entre garras para os valores experimentais e simulados de deformação na ruptura par as fibras de curauá (L_0 : 20mm)

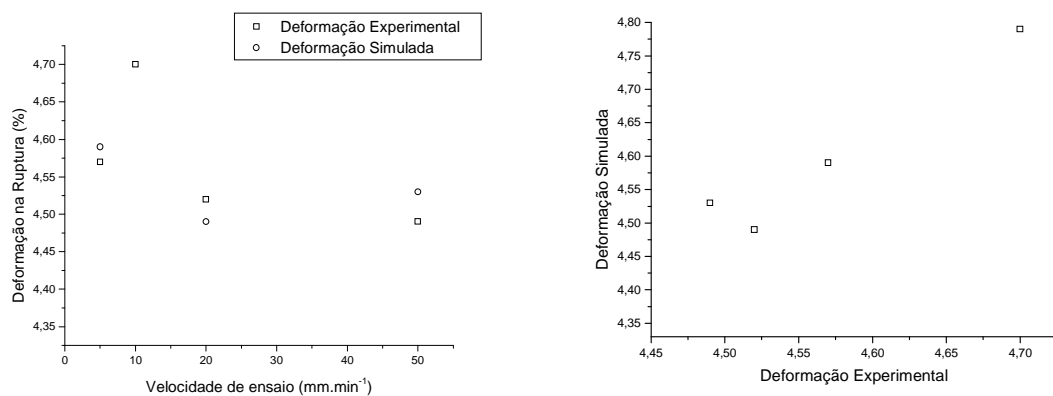


Figura 68: Influência da velocidade para os valores experimentais e simulados de deformação na ruptura para as fibras de curauá

A Figura 69 apresenta a influência do diâmetro para as fibras de coco. Com 87,79% de correlação. Na Figura 70 está apresentada a influência da distância entre garras na deformação na ruptura, com 99,91% de correlação e na Figura 71 a influência da velocidade com 93,32% de correlação. Um resumo com os resultados estão apresentados na Tabela 12 e Tabela 13

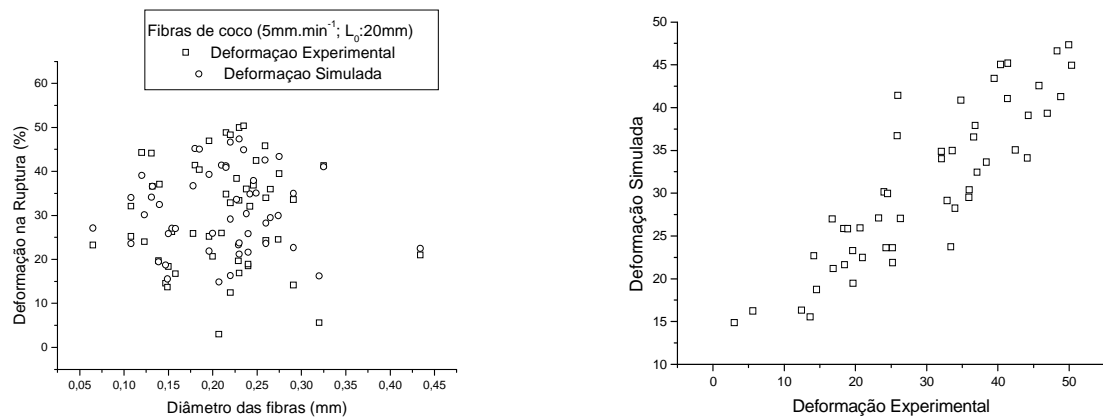


Figura 69: Influência do diâmetro nos valores experimentais e simulados de tensão na ruptura para as fibras de coco (5mm.min⁻¹; L₀: 20mm)

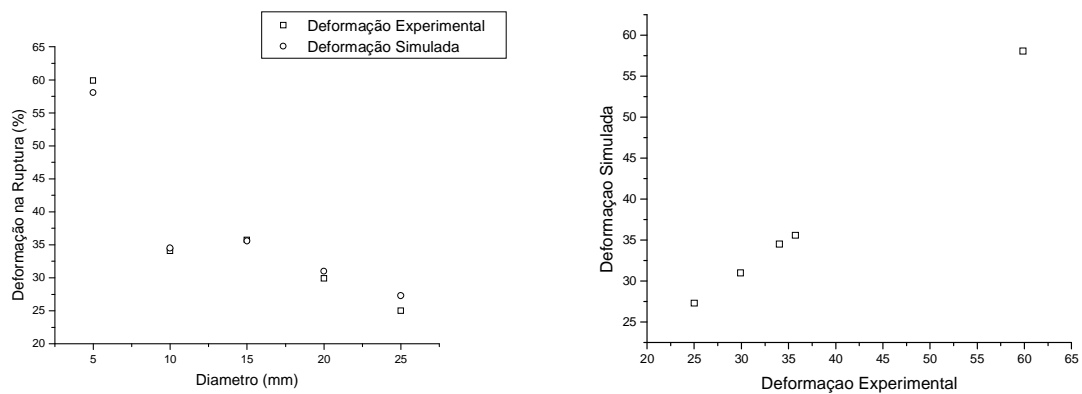


Figura 70: Influência da distância entre garras para os valores experimentais e simulados de tensão na ruptura para as fibras de coco (L₀: 20mm)

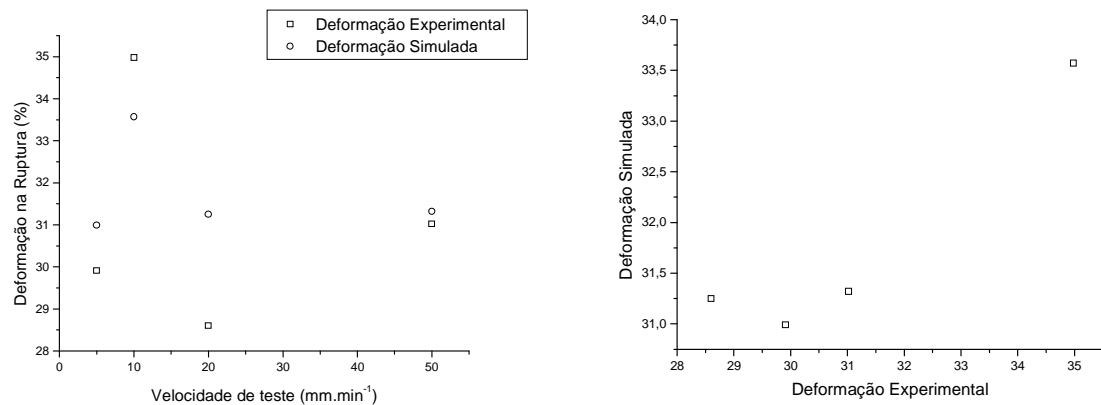


Figura 71: Influência da velocidade para os valores experimentais e simulados de tensão na ruptura para as fibras de coco

Tabela 12: Resumo dos resultados de alongamento na ruptura experimental e simulado para as fibras de coco

Fibra	Velocidade (mm,min ⁻¹)	Distancia entre garras (mm)	Deformação na Ruptura Experimental (%)	Deformação na Ruptura Simulado (%)
Coco	5	5	59,87	58,05
		10	34,04	34,51
		15	35,74	35,58
		20	29,91	30,99
		25	25,01	27,29
	10	20	34,98	33,57
	20	20	28,60	31,25
	50	20	31,02	31,32

Tabela 13:Resumo dos resultados de alongamento na ruptura experimental e simulado para as fibras de curauá

Fibra	Velocidade (mm,min ⁻¹)	Distancia entre garras (mm)	Deformação na Ruptura Experimental (%)	Deformação na Ruptura Simulado (%)
Curauá	5	5	10,20	10,71
		10	6,14	6,08
		15	4,83	4,89
		20	4,57	4,59
		25	3,74	3,87
	10	20	4,70	4,79
	20	20	4,52	4,49
	50	20	4,49	4,53

Um quadro apresentando os valores de correlações para cada situação avaliada está apresentada na Tabela 14.

Tabela 14: Resumo das correlações entre os dados experimentais e simulados para cada situação avaliada

	Módulo elástico	Tensão de ruptura	Deformação na ruptura
Efeito do diâmetro			
Coco	95,19	93,70	87,79
Curauá	91,25	90,58	92,25
Efeito da distância entre garras			
Coco	99,86	98,90	99,91
Curauá	99,55	99,43	99,79
Efeito da velocidade			
Coco	98,70	99,10	93,32
Curauá	94,79	98,72	96,63

5. CONCLUSÕES

O estudo sistemático das fibras, avaliando as propriedades mecânicas, térmicas e relacionando com as propriedades estruturais das fibras de coco e curauá revela os seguintes pontos:

As fibras de coco e curauá são fibras naturais que consistem de células de diferentes diâmetros. A superfície das fibras apresentam irregularidades que podem ser originadas no processo de extração/processamento das fibras e que afetam diretamente as propriedades mecânicas das mesmas. Foi determinada a densidade de ligações fracas como 1.106MN.m^{-3} para as fibras de coco e de $152,8\text{MN.m}^{-3}$ para as fibras de curauá. Valores baixos de densidade de ligações fracas sugerem baixas quantidades de defeitos na fibra. Avaliando estes valores, as fibras de curauá apresentam valores menores de densidade de ligações fracas, o que confere menor quantidade de defeitos nas fibras de curauá.

As propriedades mecânicas das fibras foram avaliadas verificando a influência do diâmetro das fibras. Para as fibras de coco, com o aumento do diâmetro de 65 a $434\mu\text{m}$, temos uma redução nos valores de tensão de ruptura de 276,9 para 59,96MPa e módulo elástico (4.356 para 1.310MPa), enquanto que a deformação na ruptura não é influenciada (media de 29,9%). O mesmo comportamento das propriedades mecânicas avaliadas é observado no curauá. Os diâmetros variam de 26 a $64\mu\text{m}$, o módulo elástico reduz de 96,14 para 18,9GPa, a tensão de ruptura reduz de 3.489,8 para 1.084,9MPa, e a deformação na ruptura fica constante a 4,6%. Comparando os valores entre as fibras, o coco apresenta valores mais baixos de resistência mecânica, ilustrado pelos valores de módulo elástico e tensão de ruptura menores que os encontrados no curauá. Avaliando a deformação na ruptura, o coco apresenta valores maiores que o curauá.

O efeito da distância entre garras foi avaliado através do aumento de 5 a 25mm. As fibras de curauá mostraram uma diminuição tanto na tensão de ruptura e deformação de ruptura de 2.230 para 1.784MPa e de 10,2 para

4,57%. Já o módulo elástico aumentou de 26,6 para 46,2GPa. As fibras de coco apresentaram uma redução na tensão de ruptura de 142,6 para 118,3MPa, aumento no módulo elástico de 1,27 para 2,73GPa e deformação na ruptura diminuindo de 59,8 para 25,01%. O mesmo comportamento é observado nas duas fibras confirmando que o aumento da distância entre garras há uma maior quantidade de defeitos nas fibras, reduzindo a tensão e deformação na ruptura.

O aumento da velocidade também foi avaliado nas propriedades mecânicas das fibras. Foram avaliadas as velocidades de 5, 10, 20 e 50mm.min⁻¹. A fibra de coco apresentou aumento da tensão de ruptura de 128,7 a 155,4MPa, enquanto que o módulo elástico e deformação na ruptura não apresentaram variação (2,3-2,4GPa e 12-13,6%). Nas fibras de curauá, apenas a tensão de ruptura é afetada, aumentando de 1.784,6 para 2.174,7MPa. O módulo elástico (valor médio de 48,7GPa) e de deformação na ruptura (valor médio de 4,56%) não foram afetados. Avaliando o ganho de tensão de ruptura, em ambas as fibras o ganho é de 21%, sugerindo que os mecanismos que permitem o ganho de tensão de ruptura é o mesmo para ambas as fibras.

As propriedades mecânicas foram descritas em termos de parâmetros estruturais das fibras naturais. Através das análises de microscopias eletrônicas, foi observada fratura frágil para as fibras de curauá, com saca-fibras das microfibrilas. Nas fibras de coco, a fratura dútil foi observada. Em ambos os casos, a velocidade de ensaio não afetou o modo de fratura. Também foram observados defeitos na superfície de ambas as fibras.

A análise termogravimétrica das fibras apresentou os processos de degradação para os constituintes das fibras (hemicelulose, celulose e lignina) que são bem definidos em atmosfera inerte, enquanto que em atmosfera de oxigênio, os processos de degradação não ficam bem definidos devido aos complexos processos de degradação dos componentes. A análise dinâmico-mecânica demonstrou que a água contida nas fibras tem um papel importante nas propriedades mecânicas das fibras naturais, atuando como um plastificante, reduzindo a rigidez das fibras. Com a eliminação da água

presente na estrutura da fibra observa-se um aumento nos valores do módulo de armazenamento.

As análises de difratometria de raios-X demonstraram que as fibras apresentam o pico referente à região cristalina da celulose em $2\theta=22^\circ$. O índice de cristalinidade calculado foi de 40% para as fibras de coco e de 50,2% para o curauá. Através das equações de Scherrer foi calculada as dimensões dos cristais de celulose no plano (2 0 0) como sendo de 10,3nm para as fibras de coco e de 11,2nm para as fibras de curauá. O coco apresentou menor cristalinidade e dimensões dos cristais que o curauá, justificando as melhores propriedades mecânicas encontradas nestas fibras.

Através de simulações das propriedades mecânicas por RNA, foi possível atingir uma alta correlação, maior que 90%, entre os dados experimentais e os dados simulados das propriedades mecânicas. Os resultados apontam a viabilidade do uso das redes neurais para modelar as características mecânicas das fibras naturais. Os parâmetros da entrada utilizados foram o ângulo helicoidal, quantidade de celulose, cristalinidade da fibra, diâmetro da fibra e as condições de ensaio (velocidade de ensaio e distancia entre garras) e as propriedades mecânicas. Desta forma, a utilização de RNA pode ser feita para fibras vegetais de características específicas e ainda assim, seu potencial de reforço pode ser maximizado em sua aplicação final sem a limitação da grande variabilidade destes materiais.

As diferentes propriedades das fibras avaliadas nesta tese conferem características especiais, sendo que suas aplicações em compósitos híbridos podem atribuir propriedades interessantes a estes materiais. A fibra de coco fornece uma grande tenacidade ao material, enquanto que a fibra de curauá confere elevada resistência mecânica ao material. Por isso, a combinação das duas fibras em um compósito sugere aplicações promissoras.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista os resultados obtidos neste trabalho, sugere-se que sejam analisadas as fibras de coco e curauá como reforço em matérias compósitos híbridos de matriz polimérica. Sugere-se que sejam realizados ensaios de caracterização mecânica das fibras, principalmente ensaios de tração, visando correlacionar as propriedades mecânicas das fibras e seus efeitos de reforço nos compósitos. Variações nas frações volumétricas ou mássicas das fibras podem colaborar para determinar as condições que gerem maior sinergia entre as diferentes fibras.

Uma outra proposta é a realização de uma análise através de redes neurais artificiais das propriedades dos materiais compósitos, pois se mostrou uma técnica bastante promissora e muito pouco explorada com possibilidade de bons resultados. Também é sugerido a avaliação de fibras de regiões diferentes, incluindo novas variáveis como parâmetros de entrada (clima, tipo de solo) e verificação de sua influencia nas redes neurais. As redes neurais apresentam um grande potencial para a aplicação no campo de simulação de propriedades de fibras e suas aplicações em compósitos.

7. REFERENCIAS

- 1 JACOB, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate Polymers** 71, p. 343-364, 2008.
- 2 SATYANARAYANA, K.G.; GUIMARÃES, J.L.; WYPYCH, F. Studies on lignocellulosic fibers of Brasil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. **Composites Part A**, 38, p. 1694-1709, 2007.
- 3 CHEMONS, Craig M.; CAULFIELD, Daniel F. Natural Fibers. In: XANTHOS, Marino. **Functional Fillers for plastics**. Wiley-Vch Verlag GmbH & Co KGaA, 2005.
- 4 AGUIAR NETO, Pedro Pita. **Fibras Têxteis – Volume 1**. SENAI-CETIQT, Rio de Janeiro, 1996.
- 5 BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in Polymer Science**, 24, p. 221-274, 1999.
- 6 WANBUA, Paul; IVENS, Jan; VERPOEST, Ignaas. Natural fibers: can they replace glass in fibre reinforced plastics? **Composites Science and Technology**, 63, p. 1259-1264, 2003.
- 7 MONTEIRO, Sergio Neves; AQUINO, Regina Coeli M.P.; LOPES, Felipe Perisse D. Performance of curauá fibers in pull-out tests. **Journal of Materials Science**, 43, p. 489-493, 2008.
- 8 KOZLOWSKI, Ryszard; RAWLUK, Michal; BARRIGA, Jorge. State-of-the-art production, processing and application of fibrous plants. In: **Second International Conference on Textiles (SINTEX-II) Proceedings**. Ed. RL Sivan and RC Araújo, Natal. September 2004.
- 9 JOSHI, S.V.; DRZAL, L.T.; MOHANTY, A.K.; ARORA, S. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced plastics? **Composites: Part A**; 35, p. 371-376, 2004.

- 10 KOZLOWSKI, Ryszard; WLADYKA-PRZYBYLAK, Maria. Recent developments in composites from natural fibers and polymers. In: **Second International Conference on Textiles (SINTEX-II) Proceedings**. Ed. RL Sivan and RC Araújo, Natal. September 2004.
- 11 SUDDDEL, B.C.; EVANS, W.J.; ISAAC, D.H.; CROSKY, A. A survey into the application of natural fibre composites in the automotive industry. In: **Natural Polymers and Composites IV**, p. 455-460.
- 12 CARVALHO, L.H. de; CAVALCANTI, W.S.; NÓBREGA, M.M.S. Tensile properties of hybrid vegetable/glass fiber fabric reinforced unsaturated polyester composites. In: **Natural Polymers and Composites IV**, p.486-490.
- 13 LEÃO, Alcides L.; ROWELL, Roger; TAVARES, Nilton. Applications of natural fibers in automotive industry in Brazil – Thermoforming process. **Science and Technology of Polymers and Advanced Materials**, NY, p. 755-761, 1998.
- 14 MOTHÉ, Cheila G.; ARAÚJO, Carla R. de. Caracterização térmica e mecânica de compósitos de poliuretano com fibras de curauá. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 14(4) p. 274-278, 2004.
- 15 PERVAIZ, Muhammad; SAIN, Mohini M. Carbon storage in natural fiber composites. **Resources, conservation and recycling**, 39, p. 325-340, 2003.
- 16 RODRIGUEZ, Exequiel; PETRUCCI, Roberto; PUGLIA, Débora; KENNY, José M.; VÁZQUEZ, Anália. Characterization of composites based in natural and glass fibers obtained by vacuum infusion. **Journal of composite materials**, 39, p. 265-282, 2005.
- 16 RAJULU, A. Varada; RAO, G. Babu; DEVI, L. Ganga; RAMAIAH, Sidda; PRADA, D. Shubha; BHAT, K. Shrikant; SHYLASHREE, R. Mechanical properties of short, natural fiber *Hildegardia populifolia*-reinforced styrenated polyester composites. **Journal of reinforced plastics and composite**, v. 24(4), p. 423-428, 2005.

- 18 GASSAN, Jochen. A study of fibre and interface parameters affecting the fatigue behaviour of natural fibre composites. **Composites: Part A**, 33, p. 369-374, 2002.
- 19 WIELAGE, B.; LAMPKE, Th.; MARX, G.; NESTLER, K.; STARKE, D. Thermogravimetric and differential scanning calorimetric analysis of natural fibres and polypropylene. **Thermochimica Acta**, p. 337, 169-177, 1999.
- 12 BRAHMAKUMAR, M.; PAVITHRAN, C.; PILLAI, R.M. Coconut fibre reinforced polyethylene composites: effect of the natural waxy surface layer of the fibre on fibre/matrix interfacial bonding and strength of composites. **Composites science and technology**, 65, p. 563-569, 2005.
- 21 COOK, D.J.; PAMA, R.P.; WEERASINGLE, H.L.S.D. Coir fiber reinforced cement as a low cost roofing material. **Building and environment**, 13, p. 193-198, 1978.
- 22 GEETHAMMA, V.G.; MATHEW, K. Thomas; LAKSHMINARAYANAN, R.; THOMAS, Sabu. Composites of short coir fibres and natural rubber: effect of chemical modification, loading and orientation of fibre. **Polymer**, v. 39(6-7), p. 1483-1491, 1998.
- 23 POTHAN, Laly A.; OOMMEN, Zachariah; THOMAS, Sabu. Dynamic mechanical analysis of banana fiber reinforced polyester composites. **Composites science and technology**, 63, 283-293, 2003.
- 24 POTHAN, Laly A.; NEELAKANTAN, N.R.; RAO, Bhaskar; THOMAS, Sabu. Stress relaxation of banana fiber-reinforced polyester composites. **Journal of reinforced plastics and composites**, v. 23(2), 153-165, 2004.
- 25 MWAIKAMBO, L.Y.; ANSELL, M.P. Hemp fibre reinforced cashew nut shell liquid composites. **Composites science and technology**, 63, 1297-1305, 2003.
- 26 WIELAGE, B.; LAMPKE, Th.; UTSCHICK, H.; SOERGEL, F. Processing of natural-fibre reinforced polymers and the resulting dynamic-mechanical

properties. **Journal of materials processing technology**, 139, p. 140-146, 2003.

27 NISHINO, Takashi; HIRAO, Koichi; KOTERA, Masaru; NAKATSUHIKO, Nakamae; INAGAKI, Hiroshi. Kenaf reinforced biodegradable composite. **Composites science and technology**, 63, p. 1281-1286, 2003.

28 AZIZ, Sharifah H.; ANSELL, Martin P.; CLARKE, Simon J.; PANTENY, Simon R. Modified polyester resins for natural fibre composites. **Composites Science and Technology**, 65, p. 525-535, 2005.

29 SILVA, J.L.G.; AL-QURESHI, H.A. Mechanics of wetting systems of natural fibres with polymeric resin. **Journal of materials processing technology**, 92-93, p. 124-128, 1999.

30 JOSEPH, Kuruvilla; MATTOSO, Luiz H.C. Recent developments in natural fibre based polymer composites. In: **Second International Conference on Textiles (SINTEX-II) Proceedings**. Ed. RL Sivan and RC Araújo, Natal. September 2004.

31 LI, Yan; MAI, Yiu-Wing; YE, Lin. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. **Computer Science and Technology**, 60, p. 2037-1055, 2000.

32 SATYANARAYANA, K.G.; SUKUMARAN, K.; MUKHERJEE, P.S.; PAVITHRAN, C.; PILLAI, S.G.K. Natural fibre-polymer composites. **Cement and Concrete composites**, 12, p.117-136, 1990.

33 SINGLETON, A.C.N.; BAILLIE, C.A.; BEAUMONT, P.W.R.; PEIJS, T. On the mechanical properties, deformation and fracture of a natural fibre/recycled polymer composite. **Composites: Part B**, 34, p. 519-526, 2003.

34 PAIVA, Jane M.F.; TRINDADE, Wanderson G.; FROLLINI, Elisabete. Compósitos de matriz termofixa fenólica reforçada com fibras vegetais. **Polímeros: ciência e tecnologia**, Out/Dez p.170-176, 1999.

- 35 JOSEPH, Kuruvilla; TOMAS, Sabu; PAVITHRAN, C. Effect of ageing on the physical and mechanical properties of sisal-fiber-reinforced polyethylene composites. **Composites science and technology**, 53, p. 99-110, 1995.
- 36 VALADEZ-GONZALEZ, A.; CERVANTES-UC, J.M.; OLAYO, R.; HERRETA-FRANCO, P.J. Effect of fiber surface treatment on the fiber-matrix bond strength of natural fiber reinforced composites. **Composites: Part B**, 30, p. 309-320, 1999.
- 37 HERRERA-FRANCO, P.J.; VALADEZ-GONZÁLEZ, A. Mechanical properties of continuous natural fibre-reinforced polymer composites. **Composites: Part A**, 35, p. 339-345, 2004.
- 38 KEENER, T.J.; STUART, R.K.; BROWN, T.K. Maleated coupling agents for natural fibre composites. **Composites: Part A**, 35, p. 357-362, 2004.
- 39 SATYANARAYANA, K.G.; SUKUMARAN, K.; KULKARNI, A.G.; PILLAI, S.G.K.; ROHATGI, P.K. Fabrication and properties of natural fibre-reinforced polyester composites. **Composites**, V. 17(4), p. 329-333, 1986.
- 40 HUGHES, M.; HILL, C.A.S.; HAGUE, J.R.B. The fracture toughness of bast fibre reinforced polyester composites Part 1 Evaluation and analysis. **Journal of materials science**, 37, p. 4669-4676, 2002.
- 41 MONTEIRO, S.N.; TERRONES, L.A.H.; D'ALMEIDA, J.R.M. Mechanical performance of coir/polyester composites. **Polymer testing**, 27, p. 591-595, 2008.
- 42 HARISH, S.; MICHAEL, D. Peter; BENSELY, A.; LAL, D. Mohan; RAJADURAI, A. Mechanical property evaluation of natural coir composite. **Materials characterization**, 60, p. 44-49, 2009.
- 43 GU, Huang. Tensile behaviours of the coir fibre and related composites after NaOH treatment. **Materials and Design**, 30, p. 3931-3934, 2009.
- 44 RONG, Min Zhi; ZHANG, Ming Qiu; LIU, Yuan; YANG, Gui Cheng; ZENG, Han Min. The effect of fiber treatment on the mechanical properties of

unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. **Composites Science and Technology**, 61, p. 1437-1447, 2001.

45 SILVA, R.V.; AQUINO, E.M.F.; RODRIGUES, L.P.S.; BARROS, A.R.F. Curauá/glass hybrid composite: the effect of water aging on the mechanical properties. **Journal of reinforced plastics and composites**, v. 28(15), p. 1857-1868, 2009.

46 JOHN, K.; NAIDU, S. Venkata. Sisal fiber/glass fiber hybrid composites: the impact and compressive properties. **Journal of reinforced plastics and composites**, v. 23(12) p. 1253-1258, 2004.

47 MISHRA, S.; MOHANTY, A.K.; DRZAL, L.T., MISRA, M.; PARIJA, S.; NAYAK, S.K.; TRIPATHY, S.S. Studies on mechanical performance of biofibre/glass reinforced polyester hybrid composites. **Composites Science and Technology**, 63, p. 1377-1385, 2003.

48 HAYKIN, Simon. **Redes neurais. Princípios e práticas**. Trad. Paulo Martins Engel. Bookman, 2 ed, 2001.

49 ZHANG, Z.; FRIEDRICH, K. Artificial neural networks applied to polymer composites: a review. **Composites science and technology**, 63, p. 2029-2044, 2003.

50 FERRI, Mário Guimarães. **Plantas produtoras de fibras**. Editora Pedagógica e Universitária Ltda. São Paulo.

51 MARTINS, M.A.; PESSOA, J.D.C. Pessoa; GONÇALVES, P.S.; SOUZA, F.I.; MATTOSO, L.H.C. Thermal and mechanical properties of the açai fiber/natural rubber composites. **Journal of Materials Science**, 43, 6531-6538, 2008.

52 SATYANARAYANA, K. G.; RAMOS, L. P. WYPYCH, F. Chapter 18: Comparative study of Brazilian natural fibers and their composites with others. In: **Natural Fibre Reinforced Polymer Composites**. ed: S. Thomas, L.A. Pothan, Kottayam, Kerala(India) 2009. v.1, p: 473-522, Old City Publishing Co, Philadelphia, 2009.

53 SMOOK, G. A. **Handbook for pulp and paper technologists**. Angus Wilde Publications Inc. Second Printing, 1994.

54 D'ALMEIDA J. R. M.; AQUINO R. C. M. P.; MONTEIRO S. N. Tensile mechanical properties, morphological aspects and chemical characterization of piassava (*Attalea funifera*) fibers. **Composites – Part A: Applied Science and Manufacturing**, 37, p. 1473–9, 2006.

55 SILVA, G. Goulart; SOUZA, D.A. de; MACHADO, J.C.; HOURSTON, D.J. Mechanical and thermal characterization of native Brazilian coir fiber. **Journal of applied polymer science**, 76, p. 1197-1206, 2000.

56 TANOBE, V. O. A.; MUNARO, M.; SYNDENSTRICKER, T. H. D.; AMICO, S. C. A comprehensive chemically treated Brazilian sponge gourds (luffa cylindrical). **Polymer Testing**, 24, p. 474-482, 2005.

57 CHEN, Yao; STIPANOVIC, Arthur J.; WINTER, Willian T.; WILSON, David B.; KIM, Young-Jun. Effect of digestion by pure cellulases on crystallinity and average chain length for bacterial and microcrystalline celluloses. **Cellulose**, 14, p. 283-293, 2007.

58 ELAZZOUI-HAFRAOUI, Samira; NISHIYAMA, Yoshiharu; PUTAUX, Jean-Luc; HEUX, Laurent. The shape and size distribution of crystalline nanoparticles prepared by acid hydrolysis of native cellulose. **Biomacromolecules**, 9, p. 57-65, 2008.

59 GASSAN, Jochen; CHATE, Andris; BLEDZKI, Andrzej K. Calculation of elastic properties of natural fibers. **Journal of materials science**, 36, p. 3715-3720, 2001.

60 KULKARNI, A.G.; SATYANARAYANA, K.G.; SUKUMARAN, K. Mechanical behaviour of coir fibres under tensile load. **Journal of materials science**, 16, p. 905-914, 1981.

61 SATYANARAYANA, K. G.; RAVIKUMAR, K. K.; SUKUMARAN, K.; MUKHERJEE, P. S.; PILLAI, S. G. K.; KULKARNI, A. G. Structure and

properties of some vegetable fibres – part 3 Talipot and palmyrah fibres. **Journal of Materials Science**, 21, p. 57-63, 1986.

62 MCLAUGHLIN, E. C.; TAIT, R. A. Fracture mechanism of plant fibers. **Journal of Materials Science**, 15; p. 89 – 95, 1980.

63 SATYANARAYANA, K. G; PILLAI, C. K. S.; SUKUMARAN, K.; PILLAI, S. G. K.; ROHATGI, P. K.; VIJAYAN, Kalyani. Structure property studies of fibres from various parts of the coconut tree. **Journal of materials science**, 17, p. 2453-2462, 1982.

64 SATYANARAYANA, K. G.; SUKUMARAN, K.; MUKHERJEE, P. S.; PILLAI, S. G. K. Materials science of some lignocellulosic fibers. **Metallography**, 19, p. 389 – 400, 1986.

65 SPINACÉ, Marcia A. S.; LAMBERT, Carlos S.; FERMOSELLI, Karen K. G.; DE PAOLI, Marco-A. Characterization of lignocellulosic curauá fibres. **Carbohydrate Polymers**, 77, p.47 – 53, 2009.

65 MUKHERJEE, P. S.; SATYANARAYANA, K. G. Structure and properties of some vegetable fibres – Part 1 sisal fibre. **Journal of materials science**, 19, p.3925-3934, 1984.

67 KULKARNI, A. G.; SATYANARAYANA, K. G.; ROHATGI, P. K.; VIJAYAN, Kalyani. Mechanical properties of banana fibres (Musa sepientum). **Journal of materials science** 18, p. 2290-2296, 1983.

68 MUKHERJEE, P.S.; SATYANARAYANA, K.G.. Structure and properties of some vegetable fibres – Part 2: Pinnapple fibre. **Journal of materials science**, 21: p. 51-6, 1986.

69 MWAIKAMBO, L.Y.; ANSELL, M. P. Mechanical properties of alkali treated plant fibres and their potential as reinforcement materials I. hemp fibres. **Journal of materials science**, 41, p. 2483-2496, 2006.

70 MWAIKAMBO, L.Y.; ANSELL, M. P. Mechanical properties of alkali treated plant fibres and their potential as reinforced materials II. Sisal fibres. **Journal of materials science**, 41, p. 2497-2508, 2006.

71 RONG, Min Zhi; ZHANG, Ming Qiu; LIU, Yuan; YANG, Gui Cheng; ZENG, Han Min. The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. **Composites Science and Technology**, 61, p. 1437-1447, 2001.

72 WEI, Wang; GU, Huang. Characterization and utilization of natural coconut fibres composites. **Materials and Design**, 30, p. 2741-2744, 2009.

73 RAHMAN, M. Mizanur; KHAN, Mubarak A. Surface treatment of coir (*Cocos nucifera*) fibers and its influence on the fibers physico-mechanical properties. **Composites Science and Technology**, 67, p. 2369-2376, 2007.

74 MUKHERJEE, P. S.; SATYANARAYANA, K. G. An empirical evaluation of structure-property relationships in natural fibres and their fracture behaviour. **Journal of materials science**, 21, p. 4162-4168, 1986.

75 YANG, Haiping; YAN, Rong; CHEN, Hanping; LEE, Dong Ho; ZHENG, Chuguang. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, 86, p. 1781-1788, 2007.

76 FERREIRA, LUIZ CLAUDIO; TRINDADE, WANDERSON G.; FROLLINI, ELISABETE; KAWANO, YOSHIO. RAMAN AND INFRARED SPECTRA OF NATURAL FIBERS. IN: **5th International Symposium on Natural Polymers and Composites**

77 HOAREAU, WILLIAM; TRINDADE, G. WANDERSON; SIGMUND, BERNARD, FROLLINI, ELISABETE. Sugar cane bagasse and curaua lignins oxidized by chlorine dioxide and reacted with furfuryl alcohol: chracterization and stability. *Polymer Degradation and Stability*, 86, p 567 – 576, 2004.

78 SHA, W.; EDWARDS, K. L. The use of neural networks in materials science based research. **Materials and Desing**, 28, p. 1747-1754, 2007.

79 KADI, Hani El. Modeling the mechanical behaviour of fiber-reinforced polymeric composite materials using artificial neural networks – A review. **Composite Structures**, 73, p. 1-23, 2006.

80 BEZERRA, E. M.; ANCELOTTI, A. C.; PARDINI, L. C.; ROCCO, J. A. F. F.; IHA, K.; RIBEIRO, C. H. C. Artificial neural networks applied to epoxy composites reinforced with carbon and E-Glass fibers: Analysis of the shear mechanical properties. **Materials Science & Engineering A**, 464, p.177-185, 2007.

81 AL-HAIK, M.S.; HUSSAINI, M.Y.; GARMESTANI, H. Prediction of nonlinear viscoelástico behaviour of polymeric composites using an artificial neural network. **International Journal of Plasticity**, 22, p. 1367-1392, 2006.

82 ANDERSON, J.; SPARNIS, E.; JOFFE, R.; R, WALLSTRÖM L. Strength distribution of elementary flax fibres. **Composites Science and Technology**, 65, p. 693–702, 2005

83 BALY, C. Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. **Composites – Part A**, 33, p. 939–48, 2002.

84 RAZERA IAT, FROLLINI E. Use of coir as a reinforcing material of phenolic and lignophenolic matrix composites fiber characterization and composite properties. In: **Fifth international symposium on natural polymers and composites. 8th Brazilian Symposium on the Chemistry of Lignins and Others Wood Components (ISNaPol 2002) proceedings**, São Pedro, Brasil, 1–4 September, p. 253–6, 2002.

85 SGRICCIA, N.; HAWLEY, M. C.; MISRA, M. Characterization of natural fiber surface and natural fiber composites. **Composites: Part A**; 39, p. 1632-1637, 2008.

86 LEÃO, Alcides L., CARASCHI, Jose C. and TAN, H. Curauá fiber – A tropical natural fibers from Amazon potencial and applications in composites. In: **Natural Polymer and Agrofibers Composites**, Sao Carlos, Brazil, 2000.

87 SANTOS, Paulo A.; SPINACÉ, Márcia A.S.; FERMOSELLI, Karren K.G. DE PAOLI, Marco-A. Polyamide-6/vegetal fiber composite prepared by extrusion and injection molding. **Composites: Part A**, 38, p. 2404-2411, 2007.

88 ZAH, R.; HISCHIER, R.; LEÃO, A.L.; BRAUN, I. Curauá fibers in the automotive industry – a sustainability assessment. **Journal of cleaner production**, 15, p. 1032-1040, 2007.

89 SILVA, R.V.; AQUINO, E.M.F. Curauá fiber: a new alternative to polymeric composites. **Journal of reinforced plastics and composites**, v. 27(1), p. 103-112, 2008.

90 MOTHÉ, Cheila, G.; ARAÚJO, Carla R. de; WANG, Shui H. Thermal and mechanical characterization of polyurethane/curauá fiber composites. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, 95, p. 181-185, 2009.

ANEXO I: Resultados dos ensaios mecânicos das fibras

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Coco	5	5	0,141	24,280	1.184	93,0
Coco	5	5	0,291	55,235	1.032	211,0
Coco	5	5	0,569	70,550	798	154,0
Coco	5	5	0,173	72,451	1.213	165,0
Coco	5	5	0,242	56,901	1.305	104,0
Coco	5	5	0,200	50,087	1.494	119,0
Coco	5	5	0,120	21,621	2.193	171,0
Coco	5	5	0,280	92,960	991	163,0
Coco	5	5	0,230	29,367	1.568	101,0
Coco	5	5	0,149	63,792	2.154	297,0
Coco	5	5	0,276	33,643	1.262	127,0
Coco	5	5	0,296	68,345	1.011	85,0
Coco	5	5	0,130	36,670	1.944	103,0
Coco	5	5	0,237	28,156	1.177	75,0
Coco	5	5	0,297	73,428	1.395	203,0
Coco	5	5	0,275	62,275	1.015	117,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Coco	5	10	0,129	28,000	2.083	120,0
Coco	5	10	0,147	9,900	1.451	60,0
Coco	5	10	0,192	19,900	1.879	93,0
Coco	5	10	0,196	39,800	1.918	151,0
Coco	5	10	0,264	16,500	2.018	99,0
Coco	5	10	0,279	18,590	1.764	82,0
Coco	5	10	0,183	35,590	2.352	152,0
Coco	5	10	0,273	56,740	1.540	152,0
Coco	5	10	0,123	41,860	2.413	217,0
Coco	5	10	0,205	38,477	2.291	143,0
Coco	5	10	0,132	29,505	2.375	197,0
Coco	5	10	0,468	14,754	1.646	71,0
Coco	5	10	0,270	42,612	1.648	115,0
Coco	5	15	0,210	18,370	2.344	115,0
Coco	5	15	0,215	58,670	2.576	205,0
Coco	5	15	0,241	21,400	2.684	147,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Coco	5	15	0,126	42,500	3.142	222,0
Coco	5	15	0,163	21,040	2.588	155,0
Coco	5	15	0,191	46,122	2.090	183,0
Coco	5	15	0,144	26,040	2.905	178,0
Coco	5	15	0,249	35,310	2.225	108,0
Coco	5	15	0,261	52,900	1.727	126,0
Coco	5	15	0,229	51,700	1.280	170,0
Coco	5	15	0,236	23,060	2.089	119,0
Coco	5	15	0,356	33,480	2.079	103,0
Coco	5	15	0,155	49,020	1.868	163,0
Coco	5	25	0,227	12,377	3.099	102,0
Coco	5	25	0,277	30,687	2.112	117,0
Coco	5	25	0,157	24,977	3.686	189,0
Coco	5	25	0,193	22,001	2.195	102,0
Coco	5	25	0,178	41,845	1.837	120,0
Coco	5	25	0,114	15,149	4.277	139,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Coco	5	25	0,219	20,229	2.475	99,0
Coco	5	25	0,147	6,639	4.490	131,0
Coco	5	25	0,201	8,518	3.174	84,0
Coco	5	25	0,245	42,770	2.431	144,0
Coco	5	25	0,247	30,125	3.739	220,0
Coco	5	25	0,259	37,456	2.055	119,0
Coco	5	25	0,255	44,732	1.531	137,0
Coco	5	25	0,311	17,786	1.890	72,0
Coco	5	20	0,320	5,593	1.870	60,0
Coco	5	20	0,140	37,064	3.583	220,1
Coco	5	20	0,229	19,621	2.367	107,2
Coco	5	20	0,131	44,135	3.304	230,7
Coco	5	20	0,235	50,360	2.084	146,2
Coco	5	20	0,154	26,303	2.863	146,0
Coco	5	20	0,260	24,292	1.675	74,9
Coco	5	20	0,200	20,661	2.486	119,7

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Coco	5	20	0,210	25,951	1.876	128,3
Coco	5	20	0,275	39,474	1.525	108,7
Coco	5	20	0,265	35,934	1.548	81,2
Coco	5	20	0,230	33,400	2.756	127,2
Coco	5	20	0,434	20,988	1.956	80,5
Coco	5	20	0,291	33,590	1.862	103,2
Coco	5	20	0,215	48,833	2.178	142,1
Coco	5	20	0,274	24,518	2.139	107,5
Coco	5	20	0,178	25,863	2.544	154,8
Coco	5	20	0,246	36,803	2.240	130,0
Coco	5	20	0,242	32,062	1.932	109,0
Coco	5	20	0,249	42,445	2.088	116,5
Coco	5	20	0,196	25,208	2.071	90,7
Coco	5	20	0,260	33,979	2.382	115,7
Coco	5	20	0,230	16,872	1.553	65,0
Coco	5	20	0,065	23,257	4.356	276,9

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Coco	5	20	0,220	32,870	2.276	114,6
Coco	5	20	0,149	13,660	3.800	154,3
Coco	5	20	0,139	19,671	3.577	164,3
Coco	5	20	0,215	34,802	1.974	129,5
Coco	5	20	0,230	49,951	1.721	139,1
Coco	5	20	0,325	41,342	1.503	98,5
Coco	5	20	0,238	35,972	1.747	91,7
Coco	5	20	0,123	24,009	3.727	220,2
Coco	5	20	0,291	14,147	1.466	63,7
Coco	10	20	0,280	47,874	1.754	118,8
Coco	10	20	0,235	54,571	1.549	125,1
Coco	10	20	0,210	49,036	2.379	146,5
Coco	10	20	0,189	16,992	3.287	144,3
Coco	10	20	0,218	49,130	1.492	144,7
Coco	10	20	0,212	23,276	884	56,2
Coco	10	20	0,241	29,927	1.998	97,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Coco	10	20	0,216	52,007	3.947	289,6
Coco	10	20	0,238	32,607	2.600	181,9
Coco	10	20	0,228	28,006	2.458	104,5
Coco	10	20	0,230	34,592	2.338	110,1
Coco	10	20	0,172	24,238	3.242	161,8
Coco	10	20	0,270	28,713	1.944	114,3
Coco	10	20	0,263	39,594	1.966	114,0
Coco	10	20	0,270	20,798	1.436	63,5
Coco	10	20	0,160	36,355	2.705	194,6
Coco	10	20	0,270	45,225	1.646	122,7
Coco	10	20	0,270	39,309	1.312	85,2
Coco	10	20	0,280	55,349	1.361	86,8
Coco	10	20	0,322	30,816	1.608	80,3
Coco	10	20	0,212	5,042	2.930	74,5
Coco	10	20	0,258	53,664	2.796	184,1
Coco	10	20	0,086	21,251	4.720	290,6

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Coco	10	20	0,255	31,854	1.236	87,3
Coco	10	20	0,286	51,592	1.817	130,6
Coco	10	20	0,180	36,854	1.453	83,1
Coco	10	20	0,270	28,584	2.175	98,3
Coco	10	20	0,120	42,517	2.782	145,0
Coco	10	20	0,187	12,286	1.744	68,7
Coco	10	20	0,234	70,966	2.244	167,7
Coco	10	20	0,100	23,884	1.859	101,6
Coco	10	20	0,178	29,579	1.972	126,6
Coco	10	20	0,240	34,873	1.753	80,9
Coco	20	20	0,078	21,147	3.994	271,0
Coco	20	20	0,124	37,955	1.813	117,0
Coco	20	20	0,086	19,996	3.848	266,0
Coco	20	20	0,083	21,149	4.135	211,0
Coco	20	20	0,135	34,892	1.786	174,0
Coco	20	20	0,300	23,036	1.762	90,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Coco	20	20	0,310	26,259	2.219	127,0
Coco	20	20	0,203	35,086	1.614	119,0
Coco	20	20	0,187	29,267	3.044	214,0
Coco	20	20	0,214	33,086	2.764	166,0
Coco	20	20	0,243	65,083	491	157,0
Coco	20	20	0,290	47,269	1.905	156,0
Coco	20	20	0,196	31,016	2.550	123,0
Coco	20	20	0,175	11,365	4.111	169,0
Coco	20	20	0,280	22,588	1.392	71,0
Coco	20	20	0,260	17,260	1.459	70,0
Coco	20	20	0,223	38,356	3.030	169,0
Coco	20	20	0,132	4,309	3.134	79,0
Coco	20	20	0,327	31,023	2.017	92,0
Coco	20	20	0,285	38,983	1.430	94,0
Coco	20	20	0,093	29,170	5.012	380,0
Coco	20	20	0,325	8,329	2.010	70,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Coco	20	20	0,318	12,615	1.988	70,0
Coco	20	20	0,251	31,020	2.548	145,0
Coco	20	20	0,206	5,650	2.325	74,0
Coco	20	20	0,159	34,340	1.991	141,0
Coco	20	20	0,320	17,235	1.932	64,0
Coco	20	20	0,248	54,025	1.301	152,0
Coco	20	20	0,237	17,896	3.202	161,0
Coco	20	20	0,241	6,159	2.483	87,0
Coco	20	20	0,240	25,066	2.063	104,0
Coco	20	20	0,283	39,634	2.340	119,0
Coco	20	20	0,419	29,680	1.794	92,0
Coco	20	20	0,258	23,391	1.755	72,0
Coco	50	20	0,075	30,300	5.186	438,0
Coco	50	20	0,161	38,300	2.676	211,0
Coco	50	20	0,249	53,400	1.883	175,0
Coco	50	20	0,119	29,080	5.763	359,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Coco	50	20	0,123	15,950	3.113	173,0
Coco	50	20	0,224	25,810	1.652	104,0
Coco	50	20	0,168	35,400	3.554	288,0
Coco	50	20	0,123	17,560	3.315	164,0
Coco	50	20	0,231	34,760	1.387	104,0
Coco	50	20	0,256	54,655	1.114	149,0
Coco	50	20	0,275	50,247	1.722	158,0
Coco	50	20	0,260	28,770	2.523	158,0
Coco	50	20	0,192	9,720	2.692	93,0
Coco	50	20	0,243	57,475	2.123	152,0
Coco	50	20	0,308	20,190	3.194	112,0
Coco	50	20	0,300	17,766	2.155	94,0
Coco	50	20	0,420	50,565	1.405	151,0
Coco	50	20	0,350	12,877	2.243	82,0
Coco	50	20	0,270	12,242	1.915	69,0
Coco	50	20	0,220	11,583	2.241	88,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Coco	50	20	0,222	30,202	2.625	139,0
Coco	50	20	0,199	8,729	3.796	130,0
Coco	50	20	0,230	20,599	2.668	139,0
Coco	50	20	0,250	29,620	1.849	130,0
Coco	50	20	0,240	36,667	2.596	224,0
Coco	50	20	0,178	40,746	1.701	122,0
Coco	50	20	0,196	28,028	2.253	197,0
Coco	50	20	0,256	43,269	2.127	137,0
Coco	50	20	0,200	32,599	2.634	151,0
Coco	50	20	0,233	22,900	2.694	114,0
Coco	50	20	0,131	35,300	3.337	277,0
Coco	50	20	0,170	35,400	2.029	182,0
Coco	50	20	0,303	60,300	1.560	194,0
Coco	5	5	0,252	81,136	1.290	173,0
Coco	5	5	0,242	34,922	1.301	110,0
Coco	5	5	0,175	101,536	1.109	204,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Coco	5	5	0,329	87,821	854	119,0
Coco	5	5	0,283	80,504	783	115,0
Coco	5	5	0,210	87,597	1.068	183,0
Coco	5	10	0,259	35,811	1.812	122,0
Coco	5	10	0,312	57,373	2.389	211,0
Coco	5	10	0,133	43,019	1.896	144,0
Coco	5	10	0,122	47,913	1.177	135,0
Coco	5	10	0,140	17,847	2.796	141,0
Coco	5	10	0,245	14,527	2.048	109,0
Coco	5	10	0,268	66,813	2.223	209,0
Coco	5	15	0,210	47,510	2.500	182,0
Coco	5	15	0,267	5,100	2.495	80,0
Coco	5	15	0,237	38,562	3.001	163,0
Coco	5	15	0,229	44,100	2.463	149,0
Coco	5	15	0,216	42,940	1.638	124,0
Coco	5	15	0,194	35,736	2.777	191,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Coco	5	25	0,269	31,318	1.884	108,0
Coco	5	25	0,238	15,252	2.176	79,0
Coco	5	25	0,222	28,276	2.282	106,0
Coco	5	25	0,221	21,921	2.438	94,0
Coco	5	25	0,105	18,610	4.408	99,0
Coco	5	25	0,242	5,902	2.615	73,0
Coco	5	20	0,259	45,796	1.912	125,0
Coco	5	20	0,180	41,385	1.651	143,2
Coco	5	20	0,227	38,377	1.650	95,0
Coco	5	20	0,120	44,260	1.712	140,6
Coco	5	20	0,207	2,980	2.273	60,5
Coco	5	20	0,240	18,464	1.944	82,9
Coco	5	20	0,240	18,929	1.744	83,4
Coco	5	20	0,158	16,738	2.317	116,5
Coco	5	20	0,108	32,101	2.740	189,9
Coco	5	20	0,108	25,192	3.846	196,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Coco	5	20	0,150	18,356	2.259	111,9
Coco	5	20	0,220	12,457	2.502	92,0
Coco	5	20	0,220	48,314	1.310	118,6
Coco	5	20	0,185	40,376	2.318	190,4
Coco	10	20	0,203	35,660	2.659	197,0
Coco	10	20	0,344	44,997	1.762	112,2
Coco	10	20	0,344	30,398	1.102	66,4
Coco	10	20	0,350	11,134	1.056	38,4
Coco	10	20	0,080	6,976	3.919	121,5
Coco	10	20	0,360	29,684	1.762	106,4
Coco	10	20	0,180	54,290	2.187	163,2
Coco	10	20	0,152	22,817	747	49,6
Coco	10	20	0,210	43,249	3.295	220,8
Coco	10	20	0,260	48,749	2.299	187,7
Coco	10	20	0,120	30,730	2.829	224,4
Coco	10	20	0,080	32,990	3.085	360,9

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Coco	10	20	0,147	43,222	2.566	184,0
Coco	10	20	0,224	12,765	3.773	111,9
Coco	10	20	0,300	41,240	1.796	118,4
Coco	20	20	0,321	48,491	1.225	97,0
Coco	20	20	0,164	39,943	2.439	158,0
Coco	20	20	0,287	35,837	1.590	102,0
Coco	20	20	0,263	34,716	2.642	198,0
Coco	20	20	0,270	17,043	3.210	145,0
Coco	20	20	0,300	3,318	2.302	60,0
Coco	20	20	0,189	35,090	3.067	176,0
Coco	20	20	0,255	35,843	1.717	129,0
Coco	20	20	0,305	42,991	1.755	110,0
Coco	20	20	0,255	45,662	1.905	155,0
Coco	20	20	0,225	14,090	2.496	88,0
Coco	20	20	0,130	20,505	3.738	202,0
Coco	20	20	0,202	33,542	1.876	116,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Coco	20	20	0,202	30,048	2.002	145,0
Coco	20	20	0,115	28,842	3.085	263,0
Coco	50	20	0,125	12,600	2.338	90,0
Coco	50	20	0,142	35,500	2.449	213,0
Coco	50	20	0,178	39,900	2.195	183,0
Coco	50	20	0,206	36,900	1.523	97,0
Coco	50	20	0,155	36,200	2.253	233,0
Coco	50	20	0,493	40,700	1.431	77,0
Coco	50	20	0,423	38,600	2.048	110,0
Coco	50	20	0,225	19,800	2.529	116,0
Coco	50	20	0,223	32,100	2.460	142,0
Coco	50	20	0,284	45,700	1.606	133,0
Coco	50	20	0,147	23,700	2.952	171,0
Coco	50	20	0,156	22,050	3.132	174,0
Coco	50	20	0,126	7,400	2.454	96,0
Coco	50	20	0,214	30,700	2.101	131,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Coco	50	20	0,282	34,950	2.103	160,0
Curauá	5	5	0,064	12,739	24.225	2.379,0
Curauá	5	5	0,054	11,574	21.109	1.911,0
Curauá	5	5	0,052	9,649	21.417	1.785,0
Curauá	5	5	0,037	11,468	30.498	2.992,0
Curauá	5	5	0,063	10,566	21.320	2.038,0
Curauá	5	5	0,05	10,582	27.153	2.566,0
Curauá	5	5	0,049	8,765	23.934	1.736,0
Curauá	5	5	0,091	13,963	14.907	1.747,0
Curauá	5	5	0,066	13,103	15.719	1.805,0
Curauá	5	5	0,052	9,905	24.717	2.029,0
Curauá	5	5	0,035	8,539	37.850	2.717,0
Curauá	5	5	0,038	9,732	32.268	2.750,0
Curauá	5	5	0,045	7,72	22.210	1.421,0
Curauá	5	5	0,051	10,194	20.675	1.853,0
Curauá	5	10	0,056	6,257	43.016	2.291,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Curauá	5	10	0,06	5,867	34.943	1.920,0
Curauá	5	10	0,026	3,894	68.223	2.345,0
Curauá	5	10	0,044	5,884	58.001	3.071,0
Curauá	5	10	0,036	5,033	57.891	2.777,0
Curauá	5	10	0,029	6,207	102.283	5.281,0
Curauá	5	10	0,036	6,515	41.268	2.475,0
Curauá	5	10	0,042	5,618	42.385	1.870,0
Curauá	5	10	0,06	4,576	23.524	937,0
Curauá	5	10	0,047	7,293	33.365	2.001,0
Curauá	5	10	0,052	7,672	30.438	1.927,0
Curauá	5	10	0,03	6,702	55.486	3.382,0
Curauá	5	10	0,044	5,004	36.802	1.676,0
Curauá	5	15	0,059	4,94	31.493	1.448,0
Curauá	5	15	0,05	4,31	41.997	1.634,0
Curauá	5	15	0,051	5,11	51.605	2.065,0
Curauá	5	15	0,051	4,289	38.072	1.534,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Curauá	5	15	0,052	5,577	36.644	1.718,0
Curauá	5	15	0,05	4,269	31.249	1.320,0
Curauá	5	15	0,083	4,862	28.912	1.336,0
Curauá	5	15	0,037	4,411	47.833	1.960,0
Curauá	5	15	0,034	3,599	47.899	1.640,0
Curauá	5	15	0,042	5,317	57.952	2.658,0
Curauá	5	15	0,062	4,93	46.688	2.178,0
Curauá	5	15	0,04	5,142	40.047	2.007,0
Curauá	5	15	0,048	3,499	43.504	1.374,0
Curauá	5	20	0,033	4,005	70.347	2.265,7
Curauá	5	20	0,045	4,169	40.753	1.272,7
Curauá	5	20	0,033	4,643	55.388	2.055,9
Curauá	5	20	0,045	3,535	26.732	867,6
Curauá	5	20	0,026	4,408	96.149	3.108,7
Curauá	5	20	0,037	4,803	65.989	2.353,2
Curauá	5	20	0,06	4,83	34.119	1.343,7

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Curauá	5	20	0,044	5,702	37.345	1.847,2
Curauá	5	20	0,041	6,185	18.828	1.118,7
Curauá	5	20	0,049	5,03	33.439	1.462,9
Curauá	5	20	0,036	4,243	34.966	1.401,8
Curauá	5	20	0,043	3,435	47.595	1.214,9
Curauá	5	20	0,049	5,283	34.957	1.657,4
Curauá	5	20	0,041	5,738	51.995	2.506,2
Curauá	5	20	0,05	3,994	32.790	1.155,8
Curauá	5	20	0,045	3,676	68.249	1.833,8
Curauá	5	20	0,037	5,837	63.501	3.418,5
Curauá	5	20	0,057	4,352	26.298	1.066,9
Curauá	5	20	0,052	2,274	47.141	789,6
Curauá	5	20	0,046	5,149	52.278	2.453,6
Curauá	5	20	0,055	6,409	47.394	2.451,6
Curauá	5	20	0,05	4,109	33.562	1.111,8
Curauá	5	20	0,037	5,028	68.923	3.097,5

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Curauá	5	20	0,035	4,158	72.634	2.430,0
Curauá	5	20	0,05	4,811	39.915	1.464,4
Curauá	5	20	0,037	4,371	55.737	2.289,3
Curauá	5	20	0,049	2,505	39.504	925,7
Curauá	5	20	0,052	5,129	37.931	1.688,3
Curauá	5	20	0,064	4,94	34.074	1.375,8
Curauá	5	20	0,042	5,3	57.048	2.616,9
Curauá	5	20	0,06	5,36	37.437	1.743,9
Curauá	5	20	0,043	4,563	64.137	2.659,4
Curauá	5	20	0,042	5,654	45.215	2.251,7
Curauá	5	25	0,048	4,14	80.064	3.170,0
Curauá	5	25	0,05	3,911	49.804	1.791,0
Curauá	5	25	0,05	3,283	38.077	1.169,0
Curauá	5	25	0,039	3,841	56.100	2.093,0
Curauá	5	25	0,051	4,179	40.569	1.626,0
Curauá	5	25	0,048	4,176	55.597	1.893,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Curauá	5	25	0,058	3,986	35.400	1.215,0
Curauá	5	25	0,058	4,221	44.773	1.818,0
Curauá	5	25	0,077	4,505	48.227	2.095,0
Curauá	5	25	0,043	2,549	27.326	665,0
Curauá	5	25	0,044	3,7	45.098	1.601,0
Curauá	5	25	0,049	3,962	45.970	1.749,0
Curauá	5	25	0,064	3,867	38.034	1.447,0
Curauá	5	25	0,084	5,092	46.805	2.220,0
Curauá	5	25	0,045	3,432	48.081	1.589,0
Curauá	10	20	0,043	4,493	61.356	2.285,9
Curauá	10	20	0,055	6,386	33.016	1.790,0
Curauá	10	20	0,056	2,305	38.797	770,0
Curauá	10	20	0,05	3,707	45.545	1.590,0
Curauá	10	20	0,065	4,003	37.385	1.422,0
Curauá	10	20	0,073	5,527	34.681	1.437,0
Curauá	10	20	0,044	4,679	22.336	953,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Curauá	10	20	0,056	3,739	50.193	1.373,0
Curauá	10	20	0,034	3,308	86.461	2.220,0
Curauá	10	20	0,061	3,382	65.615	1.790,0
Curauá	10	20	0,049	4,993	39.326	1.819,0
Curauá	10	20	0,05	5,038	42.197	2.044,0
Curauá	10	20	0,058	5,876	28.313	1.309,0
Curauá	10	20	0,05	5,256	64.897	2.799,0
Curauá	10	20	0,051	4,487	64.542	2.702,0
Curauá	10	20	0,057	4,922	38.637	1.769,0
Curauá	10	20	0,053	3,929	48.042	1.473,0
Curauá	10	20	0,05	3,877	46.899	1.330,0
Curauá	10	20	0,064	5,585	36.882	1.652,0
Curauá	10	20	0,04	2,858	57.670	1.263,0
Curauá	10	20	0,04	4,79	86.108	3.278,0
Curauá	10	20	0,073	4,786	28.896	1.319,0
Curauá	10	20	0,049	4,129	56.047	1.537,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Curauá	10	20	0,063	5,523	31.413	1.447,0
Curauá	10	20	0,064	5,36	28.121	1.355,0
Curauá	10	20	0,05	4,149	68.323	2.480,0
Curauá	10	20	0,04	4,181	56.857	2.274,0
Curauá	10	20	0,052	4,991	34.620	1.582,0
Curauá	10	20	0,067	6,208	41.054	2.288,0
Curauá	10	20	0,05	5,39	47.466	2.363,0
Curauá	10	20	0,082	3,77	17.385	642,0
Curauá	10	20	0,05	4,352	45.691	1.807,0
Curauá	10	20	0,071	5,362	27.486	1.211,0
Curauá	20	20	0,044	4,204	47.350	1.878,0
Curauá	20	20	0,041	4,571	63.398	2.522,0
Curauá	20	20	0,083	4,818	21.728	971,0
Curauá	20	20	0,041	3,585	83.809	2.923,0
Curauá	20	20	0,049	4,828	51.564	2.225,0
Curauá	20	20	0,074	5,033	24.548	1.073,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Curauá	20	20	0,076	4,543	41.750	1.778,0
Curauá	20	20	0,061	4,708	38.701	1.725,0
Curauá	20	20	0,061	4,988	32.009	1.487,0
Curauá	20	20	0,064	6,721	47.841	2.668,0
Curauá	20	20	0,05	3,545	36.419	1.151,0
Curauá	20	20	0,032	3,184	68.565	1.832,0
Curauá	20	20	0,04	3,892	34.760	1.346,0
Curauá	20	20	0,058	5,524	39.518	1.940,0
Curauá	20	20	0,05	4,141	53.610	2.162,0
Curauá	20	20	0,061	6,059	32.886	1.775,0
Curauá	20	20	0,058	4,914	41.247	2.028,0
Curauá	20	20	0,041	5,093	62.843	3.113,0
Curauá	20	20	0,069	4,697	48.768	2.101,0
Curauá	20	20	0,039	5,123	74.352	3.389,0
Curauá	20	20	0,043	4,365	42.539	1.784,0
Curauá	20	20	0,064	4,809	35.057	1.543,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Curauá	20	20	0,058	4,812	33.073	1.461,0
Curauá	20	20	0,046	3,504	57.260	1.754,0
Curauá	20	20	0,043	5,367	75.330	3.761,0
Curauá	20	20	0,052	5,751	37.488	1.955,0
Curauá	20	20	0,048	4,773	33.950	1.482,0
Curauá	20	20	0,045	4,472	36.376	1.561,0
Curauá	20	20	0,037	4,796	59.402	2.247,0
Curauá	20	20	0,029	3,198	81.629	2.247,0
Curauá	20	20	0,028	3,274	63.155	2.035,0
Curauá	20	20	0,043	3,827	35.907	1.361,0
Curauá	20	20	0,053	5,505	40.205	2.069,0
Curauá	50	20	0,076	4,265	41.738	1.759,0
Curauá	50	20	0,041	3,22	41.061	1.284,0
Curauá	50	20	0,051	4,98	49.048	2.255,0
Curauá	50	20	0,048	4,07	62.202	2.240,0
Curauá	50	20	0,047	4,91	57.173	2.397,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Curauá	50	20	0,053	4,269	50.474	1.999,0
Curauá	50	20	0,032	5,018	77.430	3.453,0
Curauá	50	20	0,053	4,539	45.742	1.893,0
Curauá	50	20	0,041	2,258	29.844	665,0
Curauá	50	20	0,058	5,463	51.864	2.399,0
Curauá	50	20	0,048	5,088	57.700	2.512,0
Curauá	50	20	0,053	3,735	43.785	1.538,0
Curauá	50	20	0,049	4,369	45.084	1.718,0
Curauá	50	20	0,06	3,457	30.519	1.032,0
Curauá	50	20	0,088	5,17	35.595	1.580,0
Curauá	50	20	0,052	5,312	53.557	2.517,0
Curauá	50	20	0,04	2,482	34.217	783,0
Curauá	50	20	0,03	4,561	74.066	3.080,0
Curauá	50	20	0,063	5,069	52.329	2.364,0
Curauá	50	20	0,053	5,476	45.175	2.224,0
Curauá	50	20	0,057	4,715	43.947	1.964,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Curauá	50	20	0,023	3,98	115.851	4.213,0
Curauá	50	20	0,051	4,449	49.557	2.090,0
Curauá	50	20	0,068	6,253	38.866	2.063,0
Curauá	50	20	0,036	5,055	85.443	4.001,0
Curauá	50	20	0,064	4,951	51.878	2.292,0
Curauá	50	20	0,035	4,449	92.601	3.932,0
Curauá	50	20	0,059	5,87	45.789	2.131,0
Curauá	50	20	0,048	5,417	47.532	2.239,0
Curauá	50	20	0,042	4,976	57.900	2.384,0
Curauá	50	20	0,053	4,177	44.470	1.774,0
Curauá	50	20	0,053	3,437	42.869	1.415,0
Curauá	50	20	0,053	4,258	58.072	2.269,0
Curauá	5	5	0,051	10,194	20.675	1.853,0
Curauá	5	5	0,05	10,088	26.107	2.274,0
Curauá	5	5	0,048	8,976	24.555	1.776,0
Curauá	5	5	0,059	8,007	23.349	1.597,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Curauá	5	5	0,049	9,091	22.732	1.853,0
Curauá	5	5	0,064	11,918	23.686	2.361,0
Curauá	5	5	0,026	8,611	57.054	3.779,0
Curauá	5	10	0,056	6,761	41.954	2.084,0
Curauá	5	10	0,06	5,872	27.732	1.501,0
Curauá	5	10	0,063	5,223	38.827	1.965,0
Curauá	5	10	0,052	7,486	31.117	1.824,0
Curauá	5	10	0,055	7,266	31.626	2.143,0
Curauá	5	10	0,056	7,204	30.810	1.927,0
Curauá	5	15	0,046	5,729	42.944	2.116,0
Curauá	5	15	0,043	4,426	44.757	1.818,0
Curauá	5	15	0,05	5,254	47.655	2.164,0
Curauá	5	15	0,042	5,344	48.035	2.350,0
Curauá	5	15	0,04	5,24	53.443	2.693,0
Curauá	5	15	0,041	5,246	55.888	2.721,0
Curauá	5	20	0,054	5,714	33.370	156,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Curauá	5	20	0,059	4,959	26.887	123,4
Curauá	5	20	0,061	4,021	24.856	87,0
Curauá	5	20	0,032	4,702	77.944	349,0
Curauá	5	20	0,043	3,345	44.437	132,0
Curauá	5	20	0,044	4,46	72.323	249,5
Curauá	5	20	0,056	4,563	45.116	190,0
Curauá	5	20	0,05	5,127	34.937	164,1
Curauá	5	20	0,06	5,385	27.592	126,5
Curauá	5	20	0,043	5,112	58.598	238,4
Curauá	5	20	0,035	4,294	54.301	211,8
Curauá	5	20	0,061	6,107	25.739	130,6
Curauá	5	20	0,052	2,02	30.131	53,9
Curauá	5	20	0,051	3,661	36.845	108,5
Curauá	5	20	0,05	3,543	30.229	98,2
Curauá	5	25	0,091	5,001	35.485	1.651,0
Curauá	5	25	0,067	3,96	52.789	1.975,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Curauá	5	25	0,044	4,071	84.228	3.217,0
Curauá	5	25	0,043	3,314	52.848	1.615,0
Curauá	5	25	0,034	2,725	71.892	1.931,0
Curauá	5	25	0,085	3,18	35.340	1.103,0
Curauá	10	20	0,047	4,391	47.244	1.899,0
Curauá	10	20	0,045	5,21	59.812	2.858,0
Curauá	10	20	0,074	6,842	41.319	2.407,0
Curauá	10	20	0,043	4,447	64.920	2.181,0
Curauá	10	20	0,043	5,767	56.465	2.922,0
Curauá	10	20	0,051	4,162	44.365	1.720,0
Curauá	10	20	0,05	4,725	65.605	2.767,0
Curauá	10	20	0,04	4,726	56.152	2.199,0
Curauá	10	20	0,049	4,69	54.779	2.143,0
Curauá	10	20	0,051	5,044	70.301	3.172,0
Curauá	10	20	0,05	5,143	46.806	2.189,0
Curauá	10	20	0,038	3,12	61.997	1.397,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Curauá	10	20	0,071	4,971	39.121	1.758,0
Curauá	10	20	0,076	4,499	28.423	1.075,0
Curauá	10	20	0,06	6,816	29.167	1.683,0
Curauá	20	20	0,04	4,857	46.975	2.193,0
Curauá	20	20	0,048	3,967	38.623	1.502,0
Curauá	20	20	0,051	4,195	40.799	1.608,0
Curauá	20	20	0,048	4,684	44.284	2.040,0
Curauá	20	20	0,087	5,703	29.046	1.539,0
Curauá	20	20	0,042	4,754	41.664	1.771,0
Curauá	20	20	0,043	4,232	58.720	2.298,0
Curauá	20	20	0,076	5,353	15.829	770,0
Curauá	20	20	0,072	3,819	22.530	812,0
Curauá	20	20	0,042	3,668	49.733	1.803,0
Curauá	20	20	0,051	3,177	33.961	966,0
Curauá	20	20	0,024	4,391	104.092	3.748,0
Curauá	20	20	0,044	3,802	50.493	1.691,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Curauá	20	20	0,043	3,415	36.083	1.107,0
Curauá	20	20	0,033	3,482	59.898	1.964,0
Curauá	50	20	0,055	6,042	53.063	2.515,0
Curauá	50	20	0,054	4,989	42.033	1.903,0
Curauá	50	20	0,05	3,5	40.860	1.396,0
Curauá	50	20	0,052	3,741	40.042	1.451,0
Curauá	50	20	0,053	4,638	53.344	2.079,0
Curauá	50	20	0,051	5,401	40.251	1.927,0
Curauá	50	20	0,046	4,312	56.413	2.097,0
Curauá	50	20	0,035	2,729	44.926	1.127,0
Curauá	50	20	0,025	3,458	109.036	3.588,0
Curauá	50	20	0,05	5,706	44.039	2.131,0
Curauá	50	20	0,042	3,288	50.755	1.567,0
Curauá	50	20	0,048	4,353	45.995	1.654,0
Curauá	50	20	0,046	3,477	49.658	1.579,0
Curauá	50	20	0,061	4,484	38.659	1.559,0

Fibra	Velocidade (mm/min)	Distância entre garras (mm)	Diâmetro (mm)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Curauá	50	20	0,089	6,27	44.342	2.534,0
Curauá	50	20	0,031	4,605	64.591	2.902,0